

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Ana Flávia Martins Monteiro

Itajubá, MG, Brasil

2017

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

por

Ana Flávia Martins Monteiro

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas**

Orientadora: Fabrina Bolzan Martins

Itajubá, MG, Brasil 2017

Universidade Federal de Itajubá Instituto de Recursos Naturais Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

elaborada por

Ana Flávia Martins Monteiro

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Fabrina Bolzan Martins, Dr^a. (UNIFEI) (Presidente/Orientador)

Marcelo de Paula Corrêa, Dr. (UNIFEI)

Cleverson Henrique de Freitas, Bel. Met. (ESALQ/USP)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e oportunidade de evolução.

Agradeço à minha querida orientadora, Fabrina, por todo ensinamento, dedicação e amizade criada durante esse período. Meus agradecimentos também aos demais professores que colaboraram para a minha formação, sempre dispostos a auxiliar em qualquer situação.

Um agradecimento mais que especial ao meu amado sobrinho, Caio, que, inocentemente, teve a capacidade de tornar todos os meus dias mais leves com um simples gesto de carinho. A minha mãe e meu irmão pelo incentivo e confiança depositada a mim quando nem eu mesma a possuía. Ao meu namorado, Juan, por ter vivido mais esse momento ao meu lado. Gratidão pelo companheirismo, paciência e amor.

Meu maior agradecimento dedico à Ana Letícia, que desde o primeiro dia foi a minha base, exemplo de determinação e persistência, agradeço por ter sido e continuar sendo a melhor amiga que alguém pode ter. Sou eternamente grata por ter encontrado amigos que me fortaleceram nessa reta final, Amanda, João e Gabriel, não existem palavras que traduzem o quanto vocês fizeram a diferença na minha vida. Obrigada pela sintonia e parceria desse quarteto. De modo geral, agradeço a todos os colegas pelo convívio durante esses quatro anos e que, direta ou indiretamente, me ajudaram a alcançar esse mérito.

RESUMO

Monografia de Graduação Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

AUTORA: ANA FLÁVIA MARTINS MONTEIRO ORIENTADORA: FABRINA BOLZAN MARTINS Local e Data da Defesa: Itajubá, 17 de novembro de 2017

A radiação solar global é uma variável de entrada importante em modelos de produtividade. No entanto, o registro dessa variável é realizado por instrumentos presentes nas estações meteorológicas automáticas os quais apresentam alto custo de manutenção e calibração, sendo necessária à estimativa. O objetivo deste trabalho foi ajustar, avaliar e validar 14 modelos de estimativa da radiação solar global para dez estações meteorológicas de Minas Gerais. Oito modelos utilizam como variável de entrada temperatura máxima e mínima e dois deles utilizam adicionalmente a precipitação; enquanto que os outros seis modelos utilizam os dados de entrada baseados na insolação real. Para isso, foram coletados dados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) e da plataforma do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA), no período de 1999 a 2016. O ajuste e a validação do desempenho de cada modelo foram avaliados por meio: da raiz quadrada média do erro (RQME), tendência do modelo (BIAS), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d), índice de desempenho (c) e valor ponderado (VP), significância dos coeficientes e proximidade entre os valores observados e estimados. Em geral, os modelos apresentaram tendência de superestimação para valores de radiação inferior a 10 MJ.m⁻².dia⁻¹ e subestimação para valores superiores a 25 MJ.m⁻².dia⁻¹. Os modelos que apresentam a inclusão da insolação real e a razão da insolação foram os que obtiveram melhores resultados, tanto no ajuste quanto na validação.

Palavras-chave: Modelos empíricos, Insolação real, Razão de Insolação, Temperatura do ar.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização das dez estações meteorológicas utilizadas no estudo......3

- FIGURA 2 Radiação solar global estimada versus observada (MJ.m⁻².dia⁻¹) para os cinco melhores modelos (*EY*: Ertekin e Yaldiz, 2000; *AE*: Akinoglu e Ecevit, 1990; *Nw*: Newland, 1989; *Hn*: Hunt et al., 1998 e *Gd*: Goodin et al., 1999) para as localidades de Araçuaí, Araxá, Belo Horizonte, Caratinga e Lavras. A linha cheia refere-se a reta 1:1.30
- FIGURA 3 Radiação solar global estimada versus observada (MJ.m⁻².dia⁻¹) para os cinco melhores modelos (*EY*: Ertekin e Yaldiz, 2000; *AE*: Akinoglu e Ecevit, 1990; *Nw*: Newland, 1989; *Hn*: Hunt et al., 1998 e *Gd*: Goodin et al., 1999) para as localidades de Machado, Montes Claros, Paracatu, Pirapora e Viçosa. A linha cheia refere-se a reta 1:1.

LISTA DE TABELAS

| TABELA 1 - Modelos empíricos utilizados na estimativa da radiação solar global para dez localidades de Minas Gerais |
|---|
| TABELA 2 - Localização, períodos utilizados no ajuste e validação e porcentagem de omissão dos dados utilizados nos modelos empíricos para a estimativa da radiação solar global para as dez localidades de Minas Gerais |
| TABELA 3 - Variação mensal da radiação solar global (H _s ; MJ.m ⁻² .dia ⁻¹), temperatura máxima (T _{máx} ; °C), temperatura mínima (T _{mín} ; °C) e insolação real (n; horas.dia ⁻¹), e média do acumulado de precipitação (P; mm) das dez localidades de Minas Gerais9 |
| TABELA 4 - Estatísticas utilizadas para os ajustes dos 14 modelos de estimativa de radiação solar global, coeficientes de calibração e significância para as dez localidades de Minas Gerais |
| TABELA 5 - Validação dos melhores modelos para a estimativa de radiação solar global em dez localidades de Minas Gerais. 25 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- AC Araçuaí
- AD Ampratwum e Dorvlo (1999)
- AE Akinoglu e Ecevit (1990)
- AL Alagoas
- α Latitude (graus)
- AP Amapá
- AP Angström (1924) Prescott (1940)
- AR Araxá
- AS Al-Salaymeh (2006)
- ASAS Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
- b₀, b₁, b₂, b₃, b₄, b₅, b₆ Coeficientes de calibração dos modelos (adimensional)
- BA Bahia
- BDMEP Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
- BH Belo Horizonte
- BIAS Tendência do modelo
- *Bl* Bulut (2003)
- c Índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997)
- CA Caratinga
- CE Ceará
- *Ch_1* Chen et al. (2004)
- *Ch_2* Chen et al. (2004)
- Cp Coppolino (1994)
- $\left(\frac{d}{n}\right)^2$ Distância média Terra/Sol (km)
- d Índice de concordância de Willmott (1981)
- DC Donatelli e Campbell (1998)
- δ Declinação solar (radianos)
- ΔT Amplitude térmica modificada (°C)
- Ē Média dos valores de radiação solar global estimados
- $E_i Valores$ de radiação solar global estimados pelos modelos
- EMA Estações meteorológicas automáticas
- es(Tmáx) Pressão de vapor de saturação referente a temperatura máxima (mmHg)

- es(Tmín) Pressão de vapor de saturação referente a temperatura mínima (mmHg)
- EM Elagib e Mansell (2000)
- EY-Ertekin e Yaldiz (2000)
- *Gd* Goodin et al. (1999)
- h Ângulo horário do nascer do Sol (graus)
- H_s Radiação solar global (MJ.m⁻².dia⁻¹)
- H₀ Radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ.m⁻².dia⁻¹)
- Hg Hargreaves et al. (1985)
- *Hn* Hunt et al. (1998)
- HS-Hargreaves e Samani (1982)
- i Correspondente ao dia
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- JBN Jatos de Baixos Níveis
- JS De Jong e Stewart (1993)
- *Kp_1* Kaplanis e Kaplani (2007)
- *Kp_2* Kaplanis e Kaplani (2007)
- LA Lavras
- MA Machado
- MC Montes Claros
- MG Minas Gerais
- *MH_1* Mahmood e Hubbard (2002)
- *MH_2* Mahmood e Hubbard (2002)
- MAS Monção Sul-Americana
- n Insolação real (horas.dia⁻¹)
- N Duração máxima do brilho solar fotoperíodo (horas.dia-1)
- $\left(\frac{n}{N}\right)$ Razão de insolação
- Na Annadele et al. (2002)
- nd Número de observações
- NDA -Número do dia do ano
- Nw Newland (1989)
- \bar{O} Média dos valores observados de radiação solar global
- Oi Valores de radiação solar global observados

P-Precipitação (mm)

- PA Paracatu
- PI Pirapora
- PR Paraná
- r Coeficiente de correlação de Pearson

Rd - Reddy (1987)

- RQME Raiz do quadrado médio do erro
- RS Rio Grande do Sul
- SINDA Sistema Integrado de Dados Ambientais

SP – São Paulo

- T_{avg} Amplitude térmica padrão (°C)
- TFG Tese Final de Graduação
- T_{máx} Temperatura máxima do ar (°C)
- $T_{mín}$ Temperatura mínima do ar (°C)
- TR Thornton e Running (1999)
- VI Viçosa
- VP Valor ponderado
- Wn Winslow et al. (2001)
- Ws-Weiss et al. (2001)
- z Elevação acima do nível do mar (m)
- ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

| RE | SUMO | | 7 |
|-----|---------------|--|--------|
| LIS | STA DI | E FIGURASV | [|
| LIS | STA DI | E TABELASVI | [|
| LIS | STA DI | E ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOSVII | [|
| 1. | INTF | RODUÇÃO | L |
| 2. | OBJI | ETIVO | 3 |
| 3. | DAD | OS E METODOLOGIA | 3 |
| | 3.1. 3.2. | DESCRIÇÃO DOS MODELOS COEFICIENTES DE AJUSTE (CALIBRAÇÃO) E VALIDAÇÃO DOS MODELOS | ŀ 5 |
| 4. | RESU | ULTADOS E DISCUSSÃO | 1 |
| 5. | CON | CLUSÕES | 2 |
| 6. | REFI | ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 3 |
| AN | EXOS | |) |
| | A1 - ESTAC | Modelos de estimativa da radiação solar global aplicado para a ção meteorológica de Lavras como análise preliminar: abreviatura | ١ |

EQUAÇÃO E REFERÊNCIA.

A2 - Resultados do índice c do ajuste e r da validação para Lavras.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar global (H_s) é a principal fonte de energia do sistema Terra-Atmosfera, pois atua diretamente sobre os processos atmosféricos e terrestres (SILVA et al., 2012a), influenciando as relações físico-químicas e biológicas observadas em ecossistemas agrícolas e florestais, como fotossíntese, evapotranspiração, crescimento e desenvolvimento de cultivos agrícolas e florestais (PODESTÁ et al., 2004). Além disso, constitui uma variável de entrada importante nos estudos sobre necessidade hídrica, zoneamentos agrometeorológicos, estimativas da evapotranspiração, sistemas de irrigação e em modelos de simulação do crescimento e produção de culturas, tornando-se necessário quantificar sua disponibilidade (BORGES et al., 2010; SOUZA et al., 2017).

No entanto, apesar de ser uma variável meteorológica importante, a medição da H_s não é realizada na maioria das estações meteorológicas convencionais, sendo restrita as estações meteorológicas automáticas (EMA) (BURIOL et al., 2012; SILVA et al., 2012a). Porém, o número de EMA que possuem esse registro é reduzido devido ao alto custo na aquisição, manutenção e calibração dos instrumentos, além da necessidade de profissionais qualificados para o manuseio (LIU et al., 2009; ROBAA, 2009; ALMOROX et al., 2011). Como exemplo, de acordo com o Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA), das 61 EMA do estado de Minas Gerais (MG) que estão em funcionamento em 2017, apenas 32 possuem instrumentos para a medida da H_s , e essa ausência de medições ocorre na maioria das EMA do Brasil (SOUZA et al., 2017), mesmo nas regiões mais desenvolvidas do país (JERSZURKI e SOUZA, 2013).

Por essa razão, na ausência de dados medidos de H_s , tem-se optado pela sua estimativa, principalmente através de modelos empíricos, os quais utilizam diferentes relações funcionais e a inclusão de variáveis de fácil medição, como temperatura do ar, umidade, precipitação e insolação (PODESTÁ et al., 2004; ADARAMOLA, 2012; BURIOL et al., 2012; JERSZURKI e SOUZA, 2013), constituindo um benefício, pois são variáveis frequentemente registradas em estações meteorológicas, o que tornam os modelos ferramentas apropriadas para estimar a H_s (HARGREAVES e SAMANI, 1982; THORNTON e RUNNING, 1999).

Nesse sentido, existe uma infinidade de modelos empíricos os quais diferem entre si pelo grau de complexidade e pelas variáveis de entrada (BORGES et al., 2010; SILVA et al., 2012a,b; SOUZA et al., 2017). Tais modelos são classificados basicamente em três categorias (ALMOROX et al., 2011): modelos baseados em insolação real ou brilho solar, em razão de

insolação - cobertura de nuvens (ANGSTRÖM, 1924; PRESCOTT, 1940; NEWLAND, 1989; AKINOGLU e ECEVIT, 1990; AMPRATWUN e DORVLO, 1999; ELAGIB e MANSELL, 2000; ERTEKIN e YALDIZ, 2000) e baseados em temperatura do ar e precipitação (HARGREAVES e SAMANI, 1982; HARGREAVES et al., 1985; DE JONG e STEWART, 1993; HUNT et al., 1998; GOODIN et al., 1999; WEISS et al., 2001; CHEN et al., 2004). A maioria desses modelos foi avaliada em localidades diferentes e os coeficientes de calibração mudaram consideravelmente. Assim, as relações empíricas variam espacialmente e temporalmente, o que torna imprescindível a calibração dos modelos para cada local (LIU et al., 2009; ALMOROX et al., 2011; BURIOL et al., 2012). Além disso, a maioria dos modelos são ajustados para valores médios mensais (MARTÍNEZ-LOZANO et al., 1984; SOLER, 1990; TOGRUL et al., 2000; IZIOMON e MAYER, 2002; ALMOROX e HONTORIA, 2004; ZHOU et al., 2005; LIU et al., 2009; JERSZURKI e SOUZA, 2013), sendo necessários que o ajuste seja com valores diários, comumente utilizado como variável de entrada nos modelos de evapotranspiração, necessidade hídrica e produtividade das culturas (HUNT et al., 1998; VALIPOUR et al., 2017).

Diversos estudos dessa natureza foram realizados para diferentes localidades e com diferentes modelos (HUNT et al., 1998; PODESTÁ et al., 2004; LIU et al., 2009; ALMOROX et al., 2011), inclusive para diferentes regiões e cidades do Brasil, como Maceió (AL) (SOUZA et al., 2005), Macapá (AP) (BELÚCIO et al., 2014), Cruz das Almas (BA) (BORGES et al., 2010), Barbalha (CE) (LÊDO et al., 2012), Mato Grosso (SOUZA et al., 2017), Ponta Grossa e Telêmaco Borba (PR) (PEREIRA et al., 2002; JERSZURKI e SOUZA, 2013, respectivamente), Santa Maria (RS) (BURIOL et al., 2012), Ilha Solteira e Jales (SP) (SANTOS et al., 2003; CONCEIÇÃO, 2010, respectivamente) e Minas Gerais (DANTAS et al., 2003; SILVA et al., 2012a,b). No entanto, não há confirmação da superioridade de um modelo sobre o outro, nem da melhor relação funcional e das variáveis de entrada que devem ser consideradas nos modelos empíricos. No caso de Minas Gerais, os escassos trabalhos existentes são restritos para Lavras (DANTAS et al., 2003) ou para as regiões Metropolitana, Zona da Mata e Vale do Rio Doce (SILVA et al., 2012b) e para o noroeste de Minas Gerais (SILVA et al., 2012a) considerando apenas a categoria de modelos baseados na temperatura do ar e precipitação. Nesse contexto, esforços devem ser realizados para avaliar e selecionar os melhores modelos na estimativa da radiação solar global baseado nas três categorias existentes para Minas Gerais, o que constitui o principal objetivo deste Trabalho Final de Graduação (TFG).

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste TFG foi ajustar, avaliar e validar 14 modelos empíricos amplamente utilizados na estimativa da radiação solar global para dez localidades de Minas Gerais.

3. DADOS E METODOLOGIA

Utilizou-se dados diários de temperatura máxima e mínima do ar ($T_{máx}$, $T_{mín}$; °C), insolação real (n; horas), precipitação (P; mm) obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e radiação solar global (H_s ; MJ.m⁻².dia⁻¹), obtida do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para dez localidades de Minas Gerais (Figura 1), que possuíam seus conjuntos de dados meteorológicos disponíveis simultaneamente nas duas plataformas: BDMEP e SINDA, para o período de 1999 a 2016.



Figura 1 - Localização das dez estações meteorológicas utilizadas no estudo.

Primeiramente, os dados foram submetidos a uma análise de consistência com base nos critérios de eliminação propostos por Liu et al. (2009): a) dados ausentes para qualquer uma das variáveis; b) $T_{máx} < T_{mín}$; c) $H_s/H_0 > 1$, sendo H_0 a radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ.m⁻².dia⁻¹).

3.1. Descrição dos modelos

Inicialmente optou-se por fazer uma análise preliminar com o ajuste e validação de 26 modelos empíricos disponíveis na literatura (ANEXO A1) para a cidade de Lavras, que apresentou uma base de dados excelente, com alto número de dados válidos e baixa taxa de omissões (12,1%) (Tabela 2). Com base nesses resultados (ANEXO A2), selecionou-se os 14 melhores modelos, considerando o desempenho (índice 'c') superior a 0,6, para serem ajustados para as demais localidades (Tabela 1), os quais propõem diferentes relações funcionais e a inclusão de diferentes variáveis de entrada.

| Modelo | Sigla | Equação | Referência | |
|--------|---|--|------------------|--|
| | | | Angström | |
| 1 | AP | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) \right)$ | (1924) -Prescott | |
| | | | (1940) | |
| 2 | нс | $H = H (h (T - T))^{0,5}$ | Hargreaves e | |
| 4 | 115 | $\Pi_{s} = \Pi_{0} \cdot (D_{0} \cdot (T_{max} - T_{min}))$ | Samani (1982) | |
| 3 | Ha | $H - H - h (T - T -)^{0,5} + h$ | Hargreaves et | |
| 5 | ng | $II_{S} = II_{0}. D_{0}. (I_{max} - I_{min}) + D_{1}$ | al. (1985) | |
| 4 | Nw | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) + \left(b_2 \cdot \log \frac{n}{N} \right) \right)$ | Newland (1989) | |
| 5 | ΔF | $AF \qquad H = H \left(h + \left(h - \frac{n}{n} \right) + h \left(\frac{n}{n} \right)^2 \right)$ | Akinoglu e | |
| 5 | <i>nL</i> | $H_{S} = H_{0} \cdot \left(b_{0} + \left(b_{1} \cdot \frac{N}{N} \right) + b_{2} \cdot \left(\frac{N}{N} \right) \right)$ | Ecevit (1990) | |
| 6 | IS | $H = H h (T = T =)^{b_1} (1 \pm h P \pm h P^2)$ | De Jong e | |
| U | 35 | $m_s = m_0. b_0. (m_{max} - m_{min})^{-1} \cdot (1 + b_2.1 + b_3.1)$ | Stewart (1993) | |
| 7 | Hn | $H - H - h (T - T -)^{0.5} + h - T - h - h - h - p^{2} + h$ | Hunt et al. | |
| , | 1111 | $m_s = m_0. v_0. (m_{ax} - m_{min}) + v_1. m_{ax} + v_2. r + v_3. r + v_4$ | (1998) | |
| 8 | $4D \qquad H = H_{2}\left(h_{2} + \left(h_{1} \log \frac{n}{2}\right)\right)$ | | Ampratwum e | |
| 0 | ΛD | $n_s = n_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \log N \right) \right)$ | Dorvlo (1999) | |

Tabela 1 - Modelos empíricos utilizados na estimativa da radiação solar global para dez localidades de Minas Gerais.

| 9 | Gd | $H_{s} = H_{0} \cdot b_{0} \cdot \left(1 - exp\left(-b_{1} \cdot \left(\frac{(T_{max} - T_{min})^{b_{2}}}{H_{0}} \right) \right) \right)$ | Goodin et al. (1999) |
|----|-------------|---|----------------------------|
| 10 | EM | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \exp \frac{n}{N} \right) \right)$ | Elagib e Mansell (2000) |
| 11 | EY | $H_{s} = H_{0} \cdot \left(b_{0} + \left(b_{1} \cdot \frac{n}{N} \right) + b_{2} \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^{2} + b_{3} \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^{3} \right)$ | Ertekin e Yaldiz (2000) |
| 12 | Ws | $H_s = H_0.0,75.\left(1 - \exp\left(-0,226.\frac{(\Delta T)^2}{H_0}\right)\right)$ | Weiss et al. (2001) |
| 13 | Ch_1 | $H_s = H_0 \cdot (b_0 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} + b_1)$ | Chen et al. (2004) |
| 14 | <i>Ch_2</i> | $H_s = H_0.(b_0.ln(T_{máx} - T_{min}) + b_1)$ | Chen et al. (2004) |

Em que: H_s é a radiação solar global (MJ.m⁻².dia⁻¹). H_0 é a radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ.m⁻².dia⁻¹), dado por: $H_0 = \frac{0.0864}{\pi} \cdot 1367 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left[(h \cdot sen\alpha \cdot sen\delta) + (cos\alpha \cdot cos\delta \cdot senh)\right]$; em que $\left(\frac{d}{D}\right)^2$ é a distância média Terra-Sol (km), dado por: $\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{NDA.360}{365}\right)$; NDA é número do dia do ano; h é o ângulo horário do nascer do Sol (graus), dado por: $h = \arccos - (tan\alpha \cdot tan\delta)$; α é a latitude (graus); δ é a declinação solar (radianos), dado por: $\delta = 23.45 \cdot sen\left(\frac{360.(284+NDA)}{365}\right)$. $T_{máx}$ é a temperatura máxima do dia (°C). $T_{mín}$ é a temperatura mínima do dia (°C). i corresponde ao dia. N é a duração máxima do brilho solar (horas.dia⁻¹), dado por: $N = 0.1333 \cdot \arccos[-1.(tan\alpha \cdot tan\delta)]$. n é a insolação real (horas.dia⁻¹). P é a precipitação diária (mm). ΔT é a amplitude térmica (°C), dado por: $\Delta T = \frac{T_{máx(i)} - (T_{min(i)} + T_{min(i+1)})}{2}$.

3.2. Coeficientes de ajuste (calibração) e validação dos modelos

Os dados foram divididos em dois conjuntos independentes, sendo o primeiro utilizado para calibrar os coeficientes dos modelos, os quais foram obtidos pelo ajuste dos modelos, e o segundo para avaliar e validar o desempenho dos mesmos (Tabela 2). A divisão dos dados foi realizada diferentemente para cada localidade, baseado no número de dados válidos de H_s. Por brevidade, dos 14 modelos selecionados para o ajuste (Tabela 1), somente os cinco melhores foram selecionados para avaliar o desempenho na estimativa da H_s.

Tabela 2 - Localização, períodos utilizados no ajuste e validação e porcentagem de omissão dos dados utilizados nos modelos empíricos para a estimativa da radiação solar global para as dez localidades de Minas Gerais.

| Looplidadag | Latitude | Longitude | Altitude | Ajuste | Validação | Omissões* | |
|-------------|----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|--|
| Locandades | (°) | (°) | (m) | (Anos) | (Anos) | (%) | |
| Araçuaí | -16,85 | -42,07 | 315 | 1999-2002 | 2003-2004 | 33,4 | |

| Araxá | -19,59 | -46,94 | 973 | 2001-2006 | 2007-2010 | 37,2 |
|----------------|--------|--------|-----|-----------|-----------|------|
| Belo Horizonte | -19,82 | -43,96 | 852 | 1999-2010 | 2011-2016 | 18,0 |
| Caratinga | -19,79 | -42,14 | 578 | 1999-2010 | 2011-2016 | 25,4 |
| Lavras | -21,24 | -45,00 | 919 | 1999-2010 | 2011-2016 | 12,1 |
| Machado | -21,67 | -45,92 | 820 | 2001-2010 | 2011-2016 | 19,6 |
| Montes Claros | -16,73 | -43,84 | 678 | 1999-2010 | 2011-2016 | 17,7 |
| Paracatu | -17,22 | -46,87 | 688 | 1999-2010 | 2011-2015 | 20,2 |
| Pirapora | -17,34 | -44,94 | 472 | 1999-2010 | 2011-2014 | 28,7 |
| Viçosa | -20,75 | -42,88 | 648 | 1999-2010 | 2011-2015 | 6,5 |

*As porcentagens de omissões foram calculadas dividindo-se a quantidade de dados ausentes no período pela quantidade de dados totais no período.

O ajuste dos modelos foi realizado utilizando o *software Statistica* (STATSOFT, 2008), pelo procedimento *nonlinear estimation*, considerando o método dos mínimos quadrados ordinários pela aproximação de Gauss-Newton. Para avaliar o ajuste dos modelos foram utilizadas as estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME), tendência (BIAS), coeficiente de correlação (r), concordância (d), o desempenho (c) e a significância dos coeficientes pelo teste t (α =0,05).

O RQME representa o erro médio do modelo, e quanto menor, melhor é o modelo (STRECK et al., 2008):

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{nd}}$$
(1)

em que E_i = valores de H_s estimados pelos modelos, O_i = valores de H_s observados e nd = número de observações.

O índice BIAS expressa a tendência do modelo, sendo dado pelo desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados. Quanto menor seu valor, menos tendencioso e melhor é o modelo (MARTINS et al., 2014):

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{nd} E_i - \sum_{i=1}^{nd} O_i}{\sum_{i=1}^{nd} O_i}$$
(2)

O r determina o grau de associação entre os valores estimados e observados, quanto mais próximo de um (positivo ou negativo) melhor é o modelo (MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014):

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2}}$$
(3)

em que \overline{E} = média dos valores de H_s estimados e \overline{O} = média dos valores observados de H_s pelas estações meteorológicas.

O índice d representa o quanto os valores estimados estão livres de erro, quanto mais próximo de um, maior a concordância entre os valores estimados e observados (WILLMOTT, 1981):

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{nd} (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}\right)$$
(4)

O índice c classifica o desempenho do modelo (>0,85: ótimo; 0,76 a 0,85: muito bom; 0,66 a 0,75: bom; 0,61 a 0,65: moderado; 0,51 a 0,60: fraco; 0,41 a 0,50: muito fraco e \leq 0,40: péssimo) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997):

$$c = r \cdot d \tag{5}$$

A comparação entre os 14 modelos foi feita por meio do valor ponderado dos escores estatísticos (VP) (MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014). Para tal, foi concedido para cada estatística (RQME, BIAS, r, d, c) um peso, no qual para a melhor estatística foi atribuído peso um, para o segundo melhor resultado estatístico peso dois, e assim sucessivamente. O somatório dos pesos atribuídos a cada estatística constituiu o VP e, quanto menor o seu valor, melhor é o modelo (MARTINS et al., 2014).

Baseado nos valores de VP, selecionou-se os cinco melhores modelos para realizar a validação do desempenho, a qual foi realizada pela comparação dos valores observados e estimados de H_s , obtidos com os coeficientes calibrados no ajuste. Foram utilizadas as estatísticas RQME, BIAS, r, d, c para validar o desempenho e selecionar o melhor modelo para a estimativa da H_s para cada localidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias mensais de H_s, T_{máx}, T_{mín}, n e média do acumulado de P para as dez localidades de Minas Gerais são apresentadas na Tabela 3. Variações mensais e sazonais são observadas nas dez localidades em todas as variáveis, sendo possível verificar que o aumento da H_s é geralmente acompanhado pelas variáveis T_{máx}, T_{mín} e n, o que é desejável (ADARAMOLA et al., 2012), porém não é acompanhado pela variável P. Os menores valores de H_s (média de 16,65 MJ.m⁻².dia⁻¹) são observados em Belo Horizonte e os maiores valores (média de 20,89 MJ.m⁻².dia⁻¹) em Viçosa. Essa grande variação mensal ocorre devido as atividades convectivas locais e a atuação dos sistemas de Monção Sul-Americana (MSA) que ocorre em Minas Gerais (REBOITA et al., 2015), sendo responsável pelo clima típico de monção (inverno seco e verão chuvoso), influenciando nas variáveis T_{máx}, T_{mín}, n e P. A MSA é composta pela atuação de vários sistemas atmosféricos (REBOITA et al., 2010, 2015): Jatos de Baixos Níveis (JBN), os quais transportam umidade e calor da região Amazônia para a região sudeste do Brasil, Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que transporta calor e umidade do oceano Atlântico para o continente, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é uma banda de nebulosidade que se estende da Amazônia ao sudeste do Brasil chegando ao oceano Atlântico, por exemplo. Além disso, a entrada de frentes frias, principalmente na porção sul de Minas Gerais, reduz as temperaturas e atua na ocorrência de chuvas nesta região. Isso demonstra que as variáveis utilizadas nas relações empíricas variam temporalmente e espacialmente em Minas Gerais, sendo importantes e desejáveis no ajuste de modelos de H_s, além de justificarem a calibração dos modelos para cada localidade (LIU et al., 2009; BORGES et al., 2010; ALMOROX et al., 2011; BURIOL et al., 2012).

| Meses | Variáveis | AC | AR | BH | CA | LA | MA | MC | PA | PI | VI |
|-----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Hs | 21,7 | 18,2 | 17,6 | 20,1 | 18,9 | 17,6 | 20,4 | 19,8 | 19,9 | 23,1 |
| | $T_{m\acute{a}x}$ | 32,5 | 28,0 | 28,0 | 29,7 | 28,9 | 29,1 | 30,2 | 30,4 | 31,4 | 29,1 |
| Janeiro | $T_{mín}$ | 21,5 | 19,1 | 19,7 | 19,9 | 18,5 | 18,7 | 20,0 | 20,3 | 21,4 | 19,1 |
| | n | 7,2 | 4,3 | 5,1 | 6,5 | 6,0 | 4,2 | 6,5 | 6,0 | 6,3 | 5,9 |
| | Р | 131,5 | 308,4 | 337,3 | 185,4 | 307,4 | 280,9 | 169,7 | 254,6 | 192,2 | 228,7 |
| | Hs | 22,9 | 19,8 | 19,0 | 19,0 | 19,9 | 19,1 | 22,6 | 21,1 | 21,0 | 23,7 |
| | $T_{m\acute{a}x}$ | 34,4 | 28,2 | 29,2 | 30,4 | 29,7 | 30,1 | 31,1 | 30,9 | 32,1 | 29,8 |
| Fevereiro | $T_{mín}$ | 21,8 | 18,6 | 20,2 | 19,6 | 18,4 | 18,3 | 19,9 | 20,3 | 21,2 | 18,8 |
| | n | 8,4 | 5,8 | 6,9 | 7,6 | 7,2 | 5,5 | 7,8 | 7,0 | 7,3 | 6,5 |
| | Р | 66 | 181,1 | 152,8 | 110,8 | 153,9 | 186,6 | 89,6 | 201,4 | 108,7 | 126,2 |
| | Hs | 19,7 | 19,5 | 17,2 | 16,9 | 17,6 | 17,8 | 20,4 | 19,1 | 19,5 | 20,2 |
| | $T_{m\acute{a}x}$ | 32,4 | 28,1 | 28,4 | 29,7 | 28,8 | 29,2 | 30,4 | 30,1 | 31,7 | 28,6 |
| Março | $T_{mín}$ | 21,5 | 18,7 | 19,9 | 19,3 | 18,0 | 17,8 | 20,1 | 20,0 | 21,1 | 18,6 |
| | n | 7,0 | 6,4 | 6,1 | 6,6 | 6,5 | 4,9 | 7,1 | 6,5 | 6,9 | 5,9 |
| | Р | 109,2 | 164 | 176 | 130,3 | 153,5 | 191,1 | 131,7 | 235,5 | 130,8 | 178,4 |
| | Hs | 17,0 | 18,2 | 16,7 | 15,3 | 16,6 | 16,1 | 20,2 | 19,2 | 18,3 | 18,5 |
| | $T_{m\acute{a}x}$ | 31,7 | 28,1 | 27,6 | 28,5 | 28,1 | 28,4 | 30,2 | 30,0 | 31,4 | 27,6 |
| Abril | $T_{mín}$ | 20,3 | 17,8 | 18,9 | 17,8 | 16,5 | 15,6 | 18,7 | 19,1 | 19,5 | 16,9 |
| | n | 6,5 | 7,7 | 6,8 | 6,8 | 7,6 | 5,8 | 8,0 | 8,0 | 8,1 | 6,4 |
| | Р | 32,7 | 73,3 | 78,9 | 68,6 | 48,9 | 49,9 | 45,7 | 83,4 | 43,8 | 56,4 |
| | Hs | 14,5 | 16,7 | 14,8 | 13,0 | 14,0 | 14,2 | 18,6 | 17,7 | 15,9 | 16,3 |
| | $T_{m \acute{a} x}$ | 30,6 | 25,9 | 25,7 | 26,4 | 25,3 | 25,5 | 29,3 | 28,6 | 30,3 | 25,2 |
| Maio | $T_{mín}$ | 18,6 | 14,8 | 16,6 | 14,7 | 13,4 | 11,8 | 16,3 | 16,5 | 16,6 | 13,6 |
| Maio | n | 6,3 | 8,3 | 7,0 | 6,5 | 7,1 | 5,8 | 8,4 | 8,4 | 8,0 | 6,3 |
| | Р | 17,8 | 50 | 27,2 | 36,8 | 32,8 | 43,6 | 12,8 | 13,7 | 14,7 | 27,1 |
| | Hs | 13,5 | 15,8 | 14,9 | 13,0 | 13,1 | 13,3 | 18,0 | 17,1 | 14,9 | 16,2 |
| | $T_{m\acute{a}x}$ | 29,1 | 25,6 | 25,0 | 25,6 | 24,7 | 24,7 | 28,3 | 28,0 | 29,6 | 24,4 |
| Junho | $T_{mín}$ | 16,8 | 13,3 | 15,6 | 13,3 | 12,1 | 10,1 | 14,6 | 15,0 | 14,5 | 12,0 |
| Juino _ | n | 5,8 | 8,7 | 7,4 | 6,3 | 7,3 | 5,5 | 8,6 | 8,9 | 8,4 | 6,1 |
| | Р | 6,8 | 8,6 | 13,8 | 10,7 | 21,5 | 25,4 | 2,1 | 6 | 0,6 | 14,3 |

Tabela 3 - Variação mensal da radiação solar global (H_s ; $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$), temperatura máxima ($T_{máx}$; °C), temperatura mínima ($T_{mín}$; °C) e insolação real (n; horas.dia⁻¹), e média do acumulado de precipitação (P; mm) das dez localidades de Minas Gerais.

| | Hs | 13,7 | 16,0 | 15,3 | 14,7 | 14,0 | 14,9 | 19,0 | 18,1 | 15,6 | 17,5 |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| _ | T _{máx} | 29,2 | 25,6 | 24,9 | 25,6 | 24,9 | 25,3 | 28,3 | 28,1 | 29,8 | 24,3 |
| Julho _ | $T_{mín}$ | 16,9 | 13,8 | 15,2 | 12,7 | 11,6 | 9,8 | 14,1 | 14,7 | 14,0 | 11,4 |
| _ | n | 6,0 | 8,5 | 7,4 | 6,8 | 7,6 | 5,9 | 8,8 | 8,9 | 8,5 | 6,5 |
| | Р | 2,8 | 9,4 | 8,7 | 7,2 | 13,9 | 16,3 | 1 | 1,8 | 1,2 | 8,6 |
| _ | Hs | 17,1 | 19,2 | 18,1 | 16,5 | 17,2 | 17,4 | 21,6 | 21,1 | 19,2 | 21,1 |
| | $T_{m \acute{a} x}$ | 30,6 | 27,8 | 26,4 | 27,1 | 26,9 | 27,5 | 29,6 | 30,0 | 31,2 | 26,0 |
| Agosto | $T_{mín}$ | 17,0 | 15,3 | 16,0 | 13,8 | 12,5 | 10,5 | 15,2 | 15,9 | 15,7 | 12,0 |
| _ | n | 7,6 | 8,9 | 8,0 | 7,6 | 8,5 | 7,1 | 9,2 | 9,3 | 9,1 | 6,8 |
| _ | Р | 15,2 | 19,3 | 11,4 | 5,4 | 11,5 | 14,8 | 1,4 | 11,3 | 5,2 | 13,2 |
| | Hs | 17,3 | 19,7 | 18,7 | 17,0 | 17,8 | 17,7 | 21,4 | 22,1 | 20,8 | 23,7 |
| _ | T _{máx} | 31,3 | 28,6 | 27,8 | 28,0 | 27,7 | 28,8 | 31,3 | 31,6 | 33,0 | 26,8 |
| Setembro | $T_{mín}$ | 19,5 | 16,5 | 17,3 | 15,7 | 14,6 | 13,5 | 18,1 | 18,6 | 18,9 | 14,2 |
| _ | n | 6,2 | 7,1 | 7,1 | 6,6 | 7,3 | 6,0 | 8,1 | 8,0 | 8,5 | 5,9 |
| | Р | 16,8 | 66,7 | 46,8 | 41,3 | 57,4 | 53,1 | 18 | 27 | 17,4 | 48,2 |
| | Hs | 19,3 | 19,6 | 19,0 | 17,4 | 18,7 | 18,1 | 18,7 | 21,5 | 21,2 | 21,9 |
| | T _{máx} | 33,7 | 29,2 | 28,8 | 28,8 | 28,8 | 29,4 | 31,3 | 32,5 | 34,0 | 27,4 |
| Outubro | $T_{mín}$ | 21,2 | 18,1 | 18,7 | 18,0 | 16,6 | 16,0 | 19,9 | 20,2 | 21,4 | 16,5 |
| _ | n | 7,6 | 6,3 | 6,7 | 6,2 | 6,8 | 5,5 | 6,1 | 7,3 | 7,4 | 4,9 |
| _ | Р | 55,6 | 102,5 | 105,4 | 76,7 | 94,1 | 97,4 | 84,8 | 72,7 | 44,6 | 104,9 |
| | Hs | 20,1 | 18,3 | 17,6 | 17,7 | 18,4 | 17,3 | 17,9 | 18,8 | 18,0 | 22,2 |
| _ | T _{máx} | 32,2 | 27,8 | 27,7 | 28,1 | 28,0 | 28,5 | 29,7 | 30,1 | 31,5 | 26,9 |
| Novembro | $T_{mín}$ | 21,7 | 18,3 | 18,9 | 18,9 | 17,5 | 17,4 | 20,3 | 20,1 | 21,5 | 17,8 |
| _ | n | 5,5 | 4,8 | 5,4 | 5,1 | 6,0 | 4,6 | 5,0 | 5,5 | 5,5 | 4,2 |
| _ | Р | 159,9 | 193,9 | 228 | 211,2 | 198,5 | 169 | 194 | 207,7 | 233,7 | 203,8 |
| | Hs | 19,9 | 18,4 | 17,4 | 19,2 | 18,1 | 18,2 | 19,0 | 19,0 | 18,9 | 21,4 |
| _ | T _{máx} | 32,2 | 27,7 | 28,1 | 29,1 | 28,5 | 29,1 | 30,0 | 30,0 | 31,1 | 28,1 |
| Dezembro | $T_{mín}$ | 21,7 | 18,6 | 19,4 | 19,4 | 18,3 | 18,3 | 20,2 | 20,2 | 21,4 | 19,0 |
| | n | 5,7 | 4,5 | 5,3 | 6,0 | 5,7 | 4,4 | 5,8 | 5,5 | 5,8 | 4,7 |
| | Р | 166,3 | 317,9 | 337,2 | 232,2 | 258,6 | 225,9 | 221,7 | 311,8 | 225,9 | 257,2 |

Em que: AC = Araçuaí; AR = Araxá; BH = Belo Horizonte; CA = Caratinga; LA = Lavras; MA = Machado; MC = Montes Claros; PA = Paracatu; PI = Pirapora; VI = Viçosa.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes calibrados para cada modelo ajustado nas dez localidades de Minas Gerais. De maneira geral, os coeficientes dos modelos foram significativos pelo teste t (α =0,05), exceto b₀ para o modelo *EM* (Lavras e Paracatu), b₁ para os modelos *AE* (Caratinga), *EY* (Araçuaí, Belo Horizonte e Caratinga), *Hg* (Araxá) e *Hn* (Montes Claros). Já os modelos que apresentaram b₂ não significativo foram *AE* (Araçuaí, Belo Horizonte e Caratinga), *Nw* (Araçuaí, Belo Horizonte e Caratinga), *Hn* (Araçuaí, Belo Horizonte e Caratinga), *Nw* (Araçuaí, Belo Horizonte e Caratinga), *Hn* (Araçuaí) e *JS* (Araçuaí e Caratinga). As localidades que apresentaram b₃ não significativo foram Araçuaí (*EY*, *Hn* e *JS*), Belo Horizonte (*EY* e *Hn*) e Caratinga (*EY*, *Hn* e *JS*), sendo que em todas as localidades o modelo *JS* obteve o coeficiente b₃ com valor próximo a zero (Tabela 4). O único modelo que apresenta coeficiente b₄ é o *Hn* e, com exceção de Montes Claros, foram significativos pelo teste t (α =0,05).

Hargreaves e Samani (1982) propuseram um modelo (HS) para estimar a H_s a partir da temperatura e, apesar de sua simplicidade, é fundamentado na teoria de que parte da radiação é utilizada na forma de calor sensível, havendo uma proporcionalidade direta no aumento do calor sensível durante o dia e na diferença entre T_{máx} e T_{mín} (BRISTOW e CAMPBELL, 1984). O modelo HS apresenta apenas um coeficiente empírico $-b_0$ (Tabela 1), no qual pressupõe que a diferença entre as temperaturas está relacionada à fração de radiação extraterrestre recebida no nível do solo (ALMOROX et al., 2011). Para esse modelo, o coeficiente b₀ variou de 0,1408 a 0,1729 com média de 0,159 (Tabela 4). Esses valores são ligeiramente superiores ao encontrado por Jerszurki e Souza (2013) (em média 0,12); porém, corroboram com os resultados encontrados por Silva et al. (2012a,b) para as regiões Metropolitana, Zona da Mata, Vale do Rio Doce e noroeste de Minas Gerais; por Almorox et al. (2011) para Madrid; e, são próximos ao recomendado por Allen et al. (1998) para uma região situada no interior do continente (0,16). O modelo HS apresentou péssimo ajuste entre as localidades estudadas, com VP médio de 56,4, discordando de Borges et al. (2010) para Cruz das Almas (BA), Jerszurki e Souza (2013) para o Telêmaco Borba (PR) e Almorox et al. (2011) para Madrid, porém concordando com Silva et al. (2012a,b) para as regiões Metropolitana, Zona da Mata, Vale do Rio Doce e noroeste de Minas Gerais e Lêdo et al. (2012) para Barbalha (CE).

Chen et al. (2004) (Ch_1 e Ch_2) e Hargreaves et al. (1985) (Hg) apresentaram variáveis de entrada e relação funcional semelhante ao modelo HS utilizando dois coeficientes empíricos – b₀ e b₁ (Tabela 1). De modo geral, os modelos Ch_1 e Hg apresentaram variação nos valores dos coeficientes entre as localidades (Tabela 4), diferente dos resultados encontrados por Silva et al. (2012a) e Liu et al. (2009). Essa diferença pode ter ocorrido

devido a grande variação espacial e temporal das temperaturas mínimas e máximas (Tabela 3) – variáveis de entrada dos modelos – entre as regiões de Minas Gerais (REBOITA et al., 2015). Por outro lado, no modelo Ch_2 , o coeficiente b₀ variou de 0,0679 a 0,4732 (Tabela 4), próximo ao observado por Silva et al. (2012b), e b₁ variou entre -0,5596 e 0,3199, sendo superior ao esperado por Liu et al. (2009) e Almorox et al. (2011). Essa diferença é esperada, justificando a necessidade de calibração de qualquer modelo de H_s em diferentes localidades (SOUZA et al., 2017).

Com relação ao desempenho no ajuste dos modelos Ch_1 , Ch_2 e Hg, observa-se que, apesar da variação entre as localidades, os três modelos tiveram desempenho fraco a péssimo pelo índice 'c' (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), com valores discrepantes entre as localidades, entre 0,1234 e 0,6981 para o modelo Ch_1 (VP médio de 41,3), entre 0,1233 e 0,6906 para o modelo Ch_2 (VP médio de 42,8) e entre 0,0650 e 0,6220 para o modelo Hg(VP médio de 47,2). Apesar dos métodos baseados na temperatura do ar serem considerados ferramentas boas e aceitáveis na estimativa de H_s (ALMOROX et al., 2011), a qualidade do ajuste apresenta mudanças em função da variação sazonal da temperatura do ar, o que justifica a baixa qualidade dos ajustes destes modelos nas dez localidades de Minas Gerais.

O modelo Gd, proposto por Goodin et al. (1999) pela modificação do modelo de Bristow e Campbell (1984), apresenta três coeficientes empíricos (Tabela 1). O b₀ representa a transmissividade da atmosfera em um dia de céu claro, e os coeficientes b₁ e b₂ determinam o efeito de incrementos na diferença da temperatura do ar (ALMOROX et al., 2011). No entanto, uma limitação de Gd é o pressuposto que a radiação é o único mecanismo a exercer influência na temperatura e, embora seja uma suposição válida, as atividades frontais e advecções regionais também podem contribuir para as diferenças na temperatura. Os valores de b₀ variaram entre as localidades (0,4768 - 0,8288), mas a média (0,6669) foi semelhante à observada por Silva et al. (2012b) (0,73) para as regiões de Minas Gerais: Metropolitana, Zona da Mata e Vale do Rio Doce, indicando a transmissividade para as diferentes localidades. Já os coeficientes b₁ (0,3110 - 17,2790) e b₂ (0,2947 - 7,0025) variaram bastante entre as localidades, e infelizmente, não foi possível a comparação com valores encontrados na literatura em função da escassez de estudos com esse modelo. Tal fato pode ser justificado em função do elevado valor de VP (média de 40) de Gd (Tabela 4), que, apesar de alto, foi o modelo que apresentou o segundo menor valor de VP considerando apenas os modelos dependentes da T_{máx} e T_{mín}. Resultado diferente de Souza et al. (2017), o qual foi preciso para a estimativa da H_s para a região Amazônia e Cerrado brasileiro.

| Looplideder | Madalar | | | Estatísti | cas | | | | | Coeficiente | es | |
|-------------|-----------|--------|----------|-----------|--------|--------|----|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| Locandades | Modelos - | RQME | BIAS | r | d | с | VP | b ₀ | b 1 | \mathbf{b}_2 | b ₃ | b 4 |
| | ЦС | 5,1204 | -0,0072 | 0,4545 | 0,6308 | 0,2867 | 50 | 0.1557* | | | | |
| Araçuaí | | (13) | (12) | (11) | (6) | (10) | 52 | 0,1337 | - | - | - | - |
| | Gd | 4,9145 | 0,0034 | 0,5109 | 0,5953 | 0,3042 | 50 | 0 5581* | 13 8512* | 0 8080* | _ | _ |
| | | (10) | (11) | (9) | (11) | (9) | 50 | 0,5501 | 15,6512 | 0,0700 | | |
| | ΔΡ | 4,7576 | 0,0015 | 0,5498 | 0,6585 | 0,3620 | 17 | 0.4381* | 0.1666* | _ | _ | _ |
| | | (4) | (5) | (3) | (2) | (3) | 17 | 0,4301 | 0,1000 | _ | _ | _ |
| | AF | 4,7575 | 0,0015 | 0,5498 | 0,6585 | 0,3621 | 15 | 0.4371* | 0 1726* | -0 0060ns | _ | _ |
| | | (3) | (5) | (3) | (2) | (2) | 15 | 0,4371 | 0,1720 | -0,0000 | _ | |
| | EY | 4,7529 | 0,0016 | 0,5512 | 0,6586 | 0,3630 | 10 | 0 4554* | -0.0674 ^{ns} | 0 6089 ^{ns} | -0 4230 ^{ns} | _ |
| | | (1) | (6) | (1) | (1) | (1) | 10 | 0,1551 | 0,0071 | 0,0007 | 0,1250 | |
| | AD | 4,8078 | 0,0018 | 0,5366 | 0,6458 | 0,3465 | 28 | 0.5691* | 0.1048* | - | - | - |
| | | (6) | (7) | (5) | (5) | (5) | 20 | 0,0071 | 0,1010 | | | |
| | ЕМ | 4,7623 | 0,0013 | 0,5483 | 0,6569 | 0,3601 | 20 | 0.3540* | 0.0980* | - | - | _ |
| Araçuaí | | (5) | (3) | (4) | (4) | (4) | | 0,0010 | | | | |
| | Nw Hg | 4,7566 | 0,0014 | 0,5499 | 0,6583 | 0,3621 | 13 | 0.4172* | 0.1917* | -0 0194 ^{ns} | - | - |
| | | (2) | (4) | (2) | (3) | (2) | | | 0,1217 | 0,0171 | | |
| | | 5,0701 | -4,5E-11 | 0,4545 | 0,5785 | 0,2629 | 49 | 0.1223* | 3.9621* | - | - | - |
| | | (12) | (2) | (11) | (12) | (12) | ., | 0,1220 | 0,2021 | | | |
| | $Ch \ 1$ | 4,8755 | 0,0028 | 0,5196 | 0,6163 | 0,3203 | 43 | 0.0640* | 0 3166* | _ | _ | - |
| | | (9) | (9) | (8) | (9) | (8) | | 0,0010 | 0,5100 | | | |
| | Hn | 5,0030 | 5,4E-14 | 0,4769 | 0,5990 | 0,2857 | 43 | 0.1776* | -0.4672* | 0 0337 ^{ns} | -0 0003 ^{ns} | 12.4316* |
| | | (11) | (1) | (10) | (10) | (11) | | 0,1770 | 0,1072 | 0,0007 | 0,0002 | 12,1010 |
| | Ch 2 | 4,8725 | 0,0027 | 0,5203 | 0,6188 | 0,3219 | 37 | 0.1008* | 0.2896* | - | - | _ |
| | | (8) | (8) | (7) | (7) | (7) | | 0,1000 | 0,2020 | | | |
| | JS | 4,8694 | 0,0029 | 0,5219 | 0,6171 | 0,3220 | 37 | 0.3428* | 0.1837* | -0.0017 ^{ns} | 0.0000^{ns} | - |
| | | (7) | (10) | (6) | (8) | (6) | | | -, | -, | -, | |
| | Ws | 6,8453 | -0,1762 | 0,2953 | 0,5353 | 0,1581 | 65 | - | - | - | - | - |
| | | (14) | (13) | (12) | (13) | (13) | ~~ | | | | | |
| | HS | 3,9173 | -0,0006 | 0,6499 | 0,7651 | 0,4972 | 54 | 0,1687* | - | - | - | - |
| Araxá | ~ • | (13) | (4) | (13) | (12) | (12) | - | 0.00 | 4.400.41 | 1 1000 | | |
| | Gd | 3,5398 | -0,0002 | 0,7268 | 0,8260 | 0,6004 | 34 | 0,7367* | 1,4904* | 1,4908* | - | - |

Tabela 4 - Estatísticas utilizadas para os ajustes dos 14 modelos de estimativa de radiação solar global, coeficientes de calibração e significância para as dez localidades de Minas Gerais.

| | | (7) | (3) | (7) | (9) | (8) | | | | | | |
|---------------------|------|--------|----------|--------|--------|--------|-----|---------|----------|----------|-----------------------|----------|
| | AP | 2,8501 | 0,0036 | 0,8352 | 0,8976 | 0,7497 | 25 | 0 2944* | 0 4538* | _ | _ | - |
| | | (4) | (9) | (4) | (4) | (4) | | 0,22 | 0,1000 | | | |
| | AE | 2,8062 | 0,0024 | 0,8396 | 0,9036 | 0,7587 | 17 | 0,2640* | 0,6544* | -0,2061* | - | - |
| | | (3) | (6) | (3) | (2) | (3) | | , | , | , | | |
| | EY | 2,7904 | 0,0028 | 0,8419 | 0,9044 | 0,/614 | 12 | 0,2428* | 0,9483* | -0,9827* | 0,5391* | - |
| | | (1) | (8) | (1) | (1) | (1) | | | | | | |
| | AD | 5,1020 | -0,0022 | 0,7905 | 0,8778 | 0,0957 | 29 | 0,6543* | 0,2922* | - | - | - |
| | | 2 9865 | (3) | 0.8182 | 0.8827 | (0) | | | | | | |
| | EM | 2,9805 | (10) | (5) | (5) | (5) | 30 | 0,0649* | 0,2651* | - | - | - |
| | | 2 8007 | 0.0027 | 0.8406 | 0.9035 | 0 7594 | | | | | | |
| | Nw | (2) | (7) | (2) | (3) | (2) | 16 | 0,3877* | 0,3423* | 0,0831* | - | - |
| | | 3,9169 | -9,1E-16 | 0,6499 | 0,7623 | 0,4954 | 50 | 0.1661* | 0.000(== | | | |
| | Hg | (12) | (1) | (13) | (13) | (13) | 52 | 0,1661* | 0,2926 | - | - | - |
| | Ch 1 | 3,6744 | -0,0079 | 0,7112 | 0,8315 | 0,5914 | 18 | 0.2558* | 0.2816* | | | |
| | Cn_1 | (10) | (12) | (9) | (8) | (9) | 40 | 0,2338 | -0,2810* | - | - | - |
| _ | Hn | 3,6318 | -1,4E-11 | 0,7095 | 0,8116 | 0,5758 | 43 | 0 1204* | 0 4268* | -0 1418* | 0.0009* | -6 0546* |
| | 11/1 | (9) | (2) | (10) | (11) | (11) | 75 | 0,1204 | 0,4200 | 0,1410 | 0,0007 | 0,0540 |
| | Ch_2 | 3,7343 | -0,0084 | 0,7007 | 0,8247 | 0,5779 | 55 | 0.3617* | -0.2957* | - | - | - |
| | | (11) | (13) | (11) | (10) | (10) | 55 | 0,0017 | | | | |
| | JS | 3,5933 | -0,0058 | 0,7224 | 0,8360 | 0,6039 | 41 | 0,1010* | 0,7256* | -0,0062* | 0,0000* | - |
| | | (8) | (11) | (8) | (7) | (7) | | | | | | |
| | Ws | 0,3003 | -0,2909 | 0,0530 | 0,6349 | 0,4149 | 68 | - | - | - | - | - |
| | | 5 3023 | (14) | (12) | 0 5365 | (14) | | | | | | |
| | HS | (12) | -0,0241 | (7) | (5) | (7) | 40 | 0,1692* | - | - | - | - |
| | | 4 8748 | -8 4E-05 | 0 2849 | 0 3776 | 0 1076 | | | | | | |
| | Gd | (2) | (3) | (6) | (13) | (11) | 35 | 0,8288* | 17,2790* | 0,2947* | - | - |
| Belo Horizonte — | 4.D | 4,9555 | -0,0115 | 0,3237 | 0,5372 | 0,1739 | 1.7 | 0.4010* | 0.1005* | | | |
| | AP | (6) | (5) | (1) | (2) | (1) | 15 | 0,4012* | 0,1985* | - | - | - |
| | ΛE | 4,9554 | -0,0115 | 0,3237 | 0,5367 | 0,1737 | 17 | 0.4020* | 0 1966* | 0 0121ns | | |
| | AL | (5) | (5) | (1) | (4) | (2) | 17 | 0,4029 | 0,1800* | 0,0131 | - | - |
| | FY | 4,9530 | -0,0113 | 0,3237 | 0,5352 | 0,1732 | 18 | 0.4139* | 0 0139ns | 0 4971ns | -0 3568 ^{ns} | _ |
| | EY | (4) | (4) | (1) | (6) | (3) | 18 | 0,4139* | | 0,7771 | 0,5500 | _ |
| | AD | 5,0148 | -0,0129 | 0,3071 | 0,5381 | 0,1653 | 23 | 0,5528* | 0,1133* | - | - | - |

| - | | (8) | (6) | (3) | (1) | (5) | | | | | | |
|-----------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|----|---------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------|
| | EM | 4,9588 | -0,0115 | 0,3222 | 0,5322 | 0,1715 | 25 | 0 2918* | 0 1219* | _ | _ | _ |
| - | Lin | (7) | (5) | (2) | (7) | (4) | 25 | 0,2910 | 0,1217 | | | |
| | Nw | 4,9554 | -0,0115 | 0,3237 | 0,5368 | 0,1737 | 16 | 0.3969* | 0.2039* | -0.0034 ^{ns} | _ | - |
| - | | (5) | (5) | (1) | (3) | (2) | | | -, | -, | | |
| | Hg | 4,8910 | -7,1E-16 | 0,2739 | 0,3604 | 0,0987 | 37 | 0,0694* | 10,2204* | - | - | - |
| - | 0 | (3) | (1) | (7) | (14) | (12) | | , | , | | | |
| | Ch_1 | 5,1622 | -0,0163 | 0,2648 | 0,5109 | 0,1353 | 47 | 0,0824* | 0,2622* | - | - | - |
| - | | (11) | (8) | (9) | (10) | (9) | | - | | | | |
| | Hn | 4,8605 | 2,5E-15 | 0,2941 | 0,38/9 | 0,1141 | 29 | 0,0905* | -0,1625* | -0,0572* | $0,0002^{ns}$ | 12,7945* |
| - | | (1) | (2) | (4) | (12) | (10) | | | | | | |
| | Ch_2 | 5,1588 | -0,0105 | 0,2004 | 0,5157 | 0,1308 | 43 | 0,1136* | 0,2621* | - | - | - |
| - | | 5.0634 | 0.0137 | 0.2806 | 0.5246 | 0 1510 | | | | | | |
| | JS | (9) | -0,0137 | (5) | (8) | (6) | 35 | 0,3602* | 0,1715* | -0,0065* | 0,0000* | - |
| - | | 8 6603 | -0 3820 | 0 1520 | 0.4388 | 0.0667 | | | | | | |
| | Ws | (13) | (10) | (10) | (11) | (13) | 57 | - | - | - | - | - |
| | 110 | 6,3972 | -0,0201 | 0,2219 | 0,4531 | 0,1005 | 50 | 0 1456* | | | | |
| | HS | (12) | (12) | (9) | (8) | (9) | 50 | 0,1456* | - | - | - | - |
| - | Gd | 6,2136 | -0,0118 | 0,2608 | 0,4613 | 0,1203 | 20 | 0 1769* | 6 5012* | 7.0025* | | |
| - | | (11) | (11) | (7) | (1) | (8) | 30 | 0,4708 | 0,3013 | 7,0023 | - | - |
| | ΔΡ | 6,1712 | -0,0100 | 0,2722 | 0,4604 | 0,1253 | 26 | 0.4401* | 0.0702* | _ | _ | _ |
| - | 711 | (8) | (9) | (3) | (3) | (3) | 20 | 0,7701 | 0,0702 | | _ | _ |
| | AE | 6,1698 | -0,0010 | 0,2726 | 0,4602 | 0,1255 | 24 | 0.4473* | 0 0210 ^{ns} | 0 0499 ^{ns} | - | - |
| - | | (7) | (8) | (2) | (5) | (2) | | | 0,0210 | | | |
| a | EY | 6,1661 | -0,0098 | 0,2736 | 0,4604 | 0,1260 | 15 | 0,4343* | 0,2134 ^{ns} | -0,4437 ^{ns} | 0,3296 ^{ns} | - |
| Caratinga | | (4) | (6) | (1) | (3) | (1) | | - | , | , | , | |
| | AD | 6,1//8 | -0,0103 | 0,2705 | 0,4611 | 0,1247 | 31 | 0,4955* | 0,0422* | - | - | - |
| - | | (9) | (10) | (0) | (2) | (4) | | | | | | |
| | EM | 0,1097 | -0,0099 | (2) | (4) | (2) | 21 | 0,4023* | 0,0422* | - | - | - |
| | | 6 1712 | 0.0100 | (2) | 0.4604 | 0 1253 | | | | | | |
| | Nw | (8) | -0,0100 | (3) | (3) | (3) | 26 | 0,4446* | 0,0649* | $0,0038^{ns}$ | - | - |
| | | 6 1795 | 2.4F-15 | 0 2219 | 0 2930 | 0.0650 | | | | | | |
| | Hg | (01) | (2) | (9) | (12) | (11) | 44 | 0,0675* | 675* 8,6266* | * _ | - | - |
| - | Ch 1 | 6,1619 | -0,0090 | 0,2715 | 0,4546 | 0,1234 | 23 | 0,0466* | 0,3267* | - | - | - |
| | — | | | , | | | | | | | | |

| | | (3) | (4) | (4) | (7) | (5) | | | | | | |
|--------|----------|--------|---------|--------|--------|--------|----|-----------------|----------|-----------------------|---------------|----------|
| | Hn | 6,1586 | 9,2E-16 | 0,2359 | 0,3111 | 0,0734 | 31 | 0.0927* | -0.2156* | 0.0635* | -0 0008ns | 11 8052* |
| | 11/1 | (1) | (1) | (8) | (11) | (10) | 51 | 0,0727 | -0,2150 | 0,0055 | -0,0000 | 11,0052 |
| | Ch 2 | 6,1668 | -0,0093 | 0,2705 | 0,4556 | 0,1233 | 28 | 0.0679* | 0 3199* | _ | _ | - |
| | | (5) | (5) | (6) | (6) | (6) | 20 | 0,0077 | 0,0177 | | | |
| | JS | 6,1591 | -0,0087 | 0,2712 | 0,4519 | 0,1226 | 26 | 0.3561* | 0.1296* | -0 0028 ^{ns} | 0.0000^{ns} | - |
| | | (2) | (3) | (5) | (9) | (7) | 20 | 0,0001 | 0,1220 | 0,0020 | 0,0000 | |
| | Ws | 7,8975 | -0,1672 | 0,0494 | 0,4014 | 0,0198 | 58 | - | - | _ | _ | - |
| | 115 | (13) | (13) | (10) | (10) | (12) | | | | | | |
| | HS | 3,8848 | 0,0085 | 0,7416 | 0,8068 | 0,5984 | 59 | 0.1542* | - | - | - | - |
| | | (13) | (8) | (12) | (13) | (13) | | 0,1012 | | | | |
| | Gd | 3,4483 | 0,0017 | 0,7956 | 0,8751 | 0,6962 | 37 | 0 6728* | 0 4587* | 1 9734* | _ | - |
| | | (7) | (6) | (7) | (9) | (8) | 57 | 0,0720 | 0,1007 | 1,5751 | | |
| | AP | 2,9056 | 0,0009 | 0,8598 | 0,9204 | 0,7914 | 20 | 0 2443* | 0 4872* | _ | _ | _ |
| | | (4) | (4) | (4) | (4) | (4) | 20 | 0,2113 | 0,1072 | | | |
| | AE | 2,8820 | 0,0006 | 0,8622 | 0,9223 | 0,7952 | 15 | 0.2220* | 0.6383* | -0 1560* | - | - |
| | | (3) | (3) | (3) | (3) | (3) | 10 | 0,2220 | 0,0303 | 0,1200 | | |
| | EY | 2,8765 | 0,0006 | 0,8628 | 0,9226 | 0,7960 | 11 | 0.2109* | 0.8011* | -0 5809* | 0 2917* | _ |
| | | (2) | (3) | (2) | (2) | (2) | 11 | 0,2109 | 0,0011 | 0,0007 | 0,2217 | |
| | AD | 3,3051 | -0,0027 | 0,8145 | 0,8942 | 0,7283 | 31 | 0.6332* | 0 3026* | _ | _ | _ |
| | | (6) | (7) | (6) | (6) | (6) | 51 | 0,0352 | 0,5020 | | | |
| | FM | 3,0287 | 0,0011 | 0,8466 | 0,9116 | 0,7718 | 25 | -0 0049ns | 0 2862* | _ | _ | - |
| | | (5) | (5) | (5) | (5) | (5) | 23 | 0,0015 | 0,2002 | | | |
| | Nw, | 2,8750 | 0,0006 | 0,8629 | 0,9227 | 0,7962 | 7 | 0 3219* | 0 3947* | 0.0668* | _ | _ |
| | | (1) | (3) | (1) | (1) | (1) | , | 0,5217 | 0,5747 | 0,0000 | | |
| | Hσ | 3,8161 | 5,5E-11 | 0,7416 | 0,8387 | 0,6220 | 50 | 0.1856* | -3 6502* | _ | _ | _ |
| Lavras | | (12) | (2) | (12) | (12) | (12) | 50 | 0,1050 | 5,0502 | | | |
| | $Ch \ 1$ | 3,4611 | -0,0017 | 0,7939 | 0,8794 | 0,6981 | 36 | 0 2534* | -0 3424* | _ | _ | _ |
| | | (8) | (6) | (8) | (7) | (7) | 50 | 0,2334 | 0,5424 | | | |
| | Hn | 3,6063 | 8,0E-15 | 0,7734 | 0,8623 | 0,6669 | 45 | 0.1553* | 0.2360* | -0 1986* | 0.0022* | -6 2398* |
| _ | 11/1 | (11) | (1) | (11) | (11) | (11) | | 0,1555 | 0,2300 | -0,1700 | 0,0022 | -0,2370 |
| | Ch^2 | 3,5075 | -0,0027 | 0,7879 | 0,8765 | 0,6906 | 45 | 0 3819* | -0 4059* | _ | _ | _ |
| | Cn_2 | (10) | (7) | (10) | (8) | (10) | | 0,5017 | -0,+057 | _ | _ | |
| | IS | 3,4725 | 0,0009 | 0,7922 | 0,8742 | 0,6925 | 41 | 0.0726* | 0.8050* | -0.0047* | 0.0000* | _ |
| | 35 | (9) | (4) | (9) | (10) | (9) | 41 | 0,0726* 0,8050* | -0,00+7 | 0,0000 | - | |
| | Ws | 4,5460 | -0,1430 | 0,7394 | 0,7950 | 0,5878 | 64 | - | - | - | - | - |

| | | (14) | (9) | (13) | (14) | (14) | | | | | | |
|---------------|------|--------|----------|--------|--------|--------|----|----------|----------|----------|---------|----------|
| | HS | 4,1363 | 0,0099 | 0,7056 | 0,7645 | 0,5394 | 68 | 0 1408* | _ | _ | _ | _ |
| | | (14) | (13) | (13) | (14) | (14) | 00 | 0,1400 | | | | |
| | Gd | 3,7288 | 0,0028 | 0,7587 | 0,8452 | 0,6413 | 47 | 0.6555* | 0 3766* | 1 9673* | _ | - |
| | | (9) | (11) | (9) | (9) | (9) | / | 0,0555 | 0,5700 | 1,9075 | | |
| | AP | 3,0446 | -0,0004 | 0,8464 | 0,9129 | 0,7727 | 21 | 0.2308* | 0 5986* | _ | _ | - |
| | | (4) | (5) | (4) | (4) | (4) | 21 | 0,2500 | 0,3700 | | | |
| | AE | 3,0290 | -0,0008 | 0,8482 | 0,9143 | 0,7755 | 18 | 0 2134* | 0 7529* | -0 1965* | _ | - |
| | | (3) | (6) | (3) | (3) | (3) | 10 | 0,2131 | 0,7525 | 0,1705 | | |
| | EY | 3,0006 | -0,0010 | 0,8513 | 0,9164 | 0,7801 | 12 | 0.1848* | 1.2798* | -1.9181* | 1.4656* | - |
| | | (1) | (8) | (1) | (1) | (1) | 12 | 0,1010 | 1,2790 | 1,9101 | 1,1000 | |
| | AD | 3,3718 | -0,0049 | 0,8090 | 0,8918 | 0,7214 | 36 | 0.6539* | 0 3175* | - | - | - |
| | | (6) | (12) | (6) | (6) | (6) | | 0,0000 | 0,0170 | | | |
| Machado | EM | 3,1219 | -0,0000 | 0,8377 | 0,9068 | 0,7597 | 24 | -0 1337* | 0 3922* | _ | _ | - |
| | | (5) | (4) | (5) | (5) | (5) | | 0,1007 | 0,3722 | | | |
| 1. Incline uo | Nw | 3,0153 | -0,0009 | 0,8497 | 0,9153 | 0,7777 | 15 | 0.3221* | 0.4756* | 0.0736* | - | - |
| | | (2) | (7) | (2) | (2) | (2) | | 0,0221 | 3,1700 | 0,0700 | | |
| | H q | 4,0514 | 3,2E-11 | 0,7056 | 0,8091 | 0,5709 | 54 | 0.1766* | -4.3245* | - | - | - |
| | | (13) | (2) | (13) | (13) | (13) | | 0,1700 | ., | | | |
| | Ch_1 | 3,6940 | -8,6E-05 | 0,7632 | 0,8542 | 0,6519 | 32 | 0.2355* | -0.3436* | - | - | - |
| | | (7) | (3) | (7) | (8) | (7) | | | 0,0 .00 | | | |
| | Hn | 3,8740 | 1,5E-11 | 0,7354 | 0,8329 | 0,6125 | 46 | 0.1420* | 0.2590* | -0.1860* | 0.0019* | -7.0239* |
| | | (11) | (1) | (11) | (12) | (11) | | | | | | .,, |
| | Ch 2 | 3,7044 | -0,0015 | 0,7619 | 0,8553 | 0,6516 | 40 | 0.3856* | -0.4733* | - | - | - |
| | | (8) | (9) | (8) | (7) | (8) | | -, | -, | | | |
| | JS | 3,7373 | 0,0026 | 0,7574 | 0,8442 | 0,6393 | 50 | 0,0625* | 0,8140* | -0,0038* | 0,0000* | - |
| | | (10) | (10) | (10) | (10) | (10) | | , | , | , | , | |
| | Ws | 3,9770 | -0,0182 | 0,7238 | 0,8346 | 0,6041 | 61 | - | - | - | - | - |
| | | (12) | (14) | (12) | (11) | (12) | | | | | | |
| | HS | 4,4799 | 0,0025 | 0,6194 | 0,7202 | 0,4461 | 55 | 0.1729* | - | - | - | - |
| | | (13) | (4) | (12) | (13) | (13) | | | | | | |
| Montes | Gd | 4,1155 | -0,0008 | 0,6912 | 0,8011 | 0,5537 | 31 | 0.7366* | 1.2098* | 1.6088* | - | - |
| Claros | | (7) | (3) | (7) | (7) | (7) | | | _, | -, | | |
| | AP | 3,8467 | -0,0039 | 0,7396 | 0,8464 | 0,6261 | 19 | 0,2948* | 0,4662* | - | - | - |
| | | (2) | (5) | (4) | (4) | (4) | | 0.05 | 0 | | | |
| | AE | 3,8013 | -0,0044 | 0,7473 | 0,8525 | 0,6371 | 21 | 0,2577* | 0,7117* | -0,2442* | - | - |

| | | (3) | (9) | (3) | (3) | (3) | | | | | | |
|------------|------|---------------------|----------------------|--------|----------------------|--------|-----|-----------------------|-----------------------|----------|---------|----------------------|
| | FY | 3,7785 | -0,0042 | 0,7507 | 0,8545 | 0,6415 | 15 | 0 2273* | 1 1412* | -1 3511* | 0 7490* | _ |
| | | (5) | (7) | (1) | (1) | (1) | 15 | 0,2275 | 1,1412 | -1,5511 | 0,7470 | |
| | AD | 4,0414 | -0,0068 | 0,7115 | 0,8305 | 0,5909 | 35 | 0.6819* | 0 3118* | _ | _ | - |
| | | (6) | (11) | (6) | (6) | (6) | | 0,0017 | 0,5110 | | | |
| | EM | 3,9629 | -0,0039 | 0,7205 | 0,8327 | 0,6000 | 21 | 0.0649* | 0.2679* | - | - | - |
| | | (1) | (5) | (5) | (5) | (5) | | 0,0012 | 0,2077 | | | |
| | Nw | 3,7896 | -0,0043 | 0,7491 | 0,8534 | 0,6392 | 18 | 0.4156* | 0.3264* | 0.1062* | - | - |
| | 1.00 | (4) | (8) | (2) | (2) | (2) | 10 | 0,1100 | 0,0201 | 0,1002 | | |
| | H q | 4,4704 | -7,4E-10 | 0,6194 | 0,7380 | 0,4571 | 50 | 0.1883* | -1.7795* | - | - | - |
| | | (12) | (2) | (12) | (12) | (12) | | 0,1000 | | | | |
| | Ch 1 | 4,2769 | -0,0041 | 0,6636 | 0,7906 | 0,5247 | 42 | 0.2449* | -0.2450* | - | - | - |
| | | (9) | (6) | (9) | (9) | (9) | | | •,_ •• • | | | |
| | Hn | 4,3284 | -5,5E-10 | 0,6497 | 0,7644 | 0,4967 | 45 | 0.1819* | -0.0653 ^{ns} | -0.1846* | 0.0015* | 1.3049 ^{ns} |
| | | (11) | (1) | (11) | (11) | (11) | | | •,•••• | -, | | -,- • · · |
| | Ch 2 | 4,2458 | -0,0049 | 0,6709 | 0,7977 | 0,5352 | 42 | 0.3708* | -0,3109* | - | - | - |
| | | (8) | (10) | (8) | (8) | (8) | | , | , | | | |
| | JS | 4,2819 | -0,0025 | 0,6605 | 0,7833 | 0,5174 | 44 | 0,1198* | 0,6523* | -0,0056* | 0,0000* | - |
| | | (10) | (4) | (10) | (10) | (10) | | | | | , | |
| | Ws | 6,7989 | -0,2594 | 0,6172 | 0,6588 | 0,4066 | 67 | - | - | - | - | - |
| | 115 | (14) | (12) | (13) | (14) | (14) | | | | | | |
| | HS | 4,4045 | 0,0028 | 0,6102 | 0,7058 | 0,4306 | 63 | 0,1726* | - | - | - | - |
| | | (13) | (10) | (13) | (13) | (14) | | - | | | | |
| | Gd | 3,6125 | -0,0018 | 0,/589 | 0,8552 | 0,6490 | 35 | 0,7401* | 0,3110* | 2,1687* | - | - |
| | | (6) | (8) | (/) | (/) | (/) | | - | | | | |
| | AP | 3,1844 | -0,0008 | 0,8186 | 0,8954 | 0,7329 | 20 | 0,2598* | 0,5240* | - | - | - |
| | | (4) | (4) | (4) | (4) | (4) | | | | | | |
| D (| AE | 3,16/0 | -0,0014 | 0,8209 | 0,8977 | 0,7370 | 19 | 0,2357* | 0,6746* | -0,1508* | - | - |
| Paracatu | | (3) | (/) | (3) | (3) | (3) | | | | | | |
| | EY | 3,1502 | -0,0011 | 0,8229 | 0,8985 | 0,7394 | 9 | 0,2083* | 1,0382* | -1,1038* | 0,6628* | - |
| | | $\frac{(1)}{26226}$ | (5) | (1) | $\frac{(1)}{0.8620}$ | (1) | | | | | | |
| | AD | 3,0230 | -0,0057 | 0,7013 | 0,8629 | 0,6570 | 37 | 0,6876* | 0,3541* | - | - | - |
| | | (/) | (12) | (6) | (0) | (6) | | | | | | |
| | EM | 3,2807 | -0,0002 | 0,8054 | 0,8854 | 0,/131 | 23 | -0,0031 ^{ns} | 0,3052* | - | - | - |
| | λζ | (3) | $\frac{(3)}{0.0012}$ | (3) | (3) | (3) | 1.4 | 0.2254* | 0 4257* | 0.0605* | | |
| | INW | 3,1398 | -0,0013 | 0,8218 | 0,8981 | 0,7380 | 14 | 0,3334* | 0,4337* | 0,0093* | - | - |

| | | (2) | (6) | (2) | (2) | (2) | | | | | | |
|----------|----------|--------|--------------------------|--------|--------|--------|----|---------|----------|----------|---------|-----------|
| | Ha | 4,3910 | -9,3E-11 | 0,6102 | 0,7285 | 0,4445 | 52 | 0 1919* | -2 2254* | _ | _ | _ |
| | 118 | (12) | (2) | (13) | (12) | (13) | 52 | 0,1717 | 2,223- | | | |
| | $Ch \ 1$ | 3,8854 | -0,0052 | 0,7177 | 0,8328 | 0,5977 | 49 | 0 3086* | -0 4577* | _ | - | _ |
| | 0.11 | (10) | (11) | (10) | (9) | (9) | | 0,0000 | 0,1077 | | | |
| | Hn | 4,0237 | -1,3E-11 | 0,6877 | 0,7961 | 0,5475 | 46 | 0.1452* | 0.3331* | -0.2221* | 0.0018* | -6.2670* |
| | | (11) | (1) | (12) | (11) | (11) | | -, | -, | | | -, |
| | Ch 2 | 3,8733 | -0,0059 | 0,7210 | 0,8360 | 0,6027 | 46 | 0.4732* | -0.5596* | - | - | _ |
| | | (9) | (13) | (8) | (8) | (8) | - | | | | | |
| | JS | 3,8629 | -0,0024 | 0,7182 | 0,8275 | 0,5943 | 46 | 0.0840* | 0,8026* | -0,0078* | 0.0000* | - |
| | | (8) | (9) | (9) | (10) | (10) | - | | | | | |
| | Ws | 6,5084 | -0,2661 | 0,6951 | 0,6644 | 0,4619 | 65 | - | - | _ | - | - |
| | | (14) | (14) | (11) | (14) | (12) | | | | | | |
| | HS | 3,7412 | 0,0078 | 0,7272 | 0,7680 | 0,5585 | 63 | 0,1632* | - | _ | - | - |
| | | (13) | (12) | (12) | (13) | (13) | | , | | | | |
| | Gd | 3,4000 | 0,0020 | 0,7638 | 0,84/8 | 0,6476 | 36 | 0,6579* | 0,4435* | 2,1255* | - | - |
| | | (7) | (8) | (7) | (7) | (7) | | | | | | |
| | AP | 2,9822 | 0,0019 | 0,8244 | 0,8935 | 0,/366 | 23 | 0,2694* | 0,4741* | - | - | - |
| | | (4) | (/) | (4) | (4) | (4) | | | | | | |
| | AE | 2,9525 | 0,0017 | 0,8281 | 0,8966 | 0,7424 | 17 | 0,2375* | 0,6732* | -0,2026* | - | - |
| | | (3) | (5) | (3) | (3) | (3) | | | | | | |
| | EY | 2,9476 | 0,0016 | 0,8286 | 0,8972 | 0,7434 | 8 | 0,2234* | 0,8650* | -0,7044* | 0,3508* | - |
| | | (1) | (4) | (1) | (1) | (1) | | | | | | |
| | AD | 5,2825 | -0,0008 | 0,7813 | 0,8085 | 0,0787 | 27 | 0,6539* | 0,3114* | - | - | - |
| | | 2 0927 | (3) | (0) | | (0) | | | | | | |
| | EM | 5,0857 | (6) | (5) | (5) | (5) | 26 | 0,0310* | 0,2774* | - | - | - |
| | | 2 9/91 | 0.0017 | 0.8285 | 0.8060 | 0.7431 | | | | | | |
| Pirapora | Nw | (2) | (5) | (2) | (2) | (2) | 13 | 0,3568* | 0,3707* | 0,0788* | - | - |
| | | 3 6105 | $\frac{(5)}{1.6E_{-}11}$ | (2) | 0.8263 | 0.6009 | | | | | | |
| | Hg | (11) | (2) | (12) | (10) | (10) | 45 | 0,2186* | -6,5606* | - | - | - |
| | | 3 6119 | 0.0037 | 0.7307 | 0.8122 | 0 593/ | | | | | | |
| | Ch_1 | (12) | (10) | (11) | (11) | (12) | 56 | 0,2172* | -0,1884* | - | - | - |
| | | 3 4688 | 1.0F-14 | 0.7517 | 0.8454 | 0.6355 | | | | | | |
| | Hn | (8) | (1) | (8) | (8) | (8) | 33 | 0,1630* | 0,3572* | -0,1119* | 0,0007* | -11,0473* |
| | Ch 2 | 3 5183 | 0.0031 | 0.7456 | 0.8284 | 0.6176 | 45 | 0 3493* | -0.2956* | _ | - | _ |
| | <u> </u> | 5,5105 | 0,0051 | 0,7400 | 0,0204 | 0,0170 | | 0,5475 | 0,2750 | | | |

| | | (9) | (9) | (9) | (9) | (9) | | | | | | |
|---------|-----------|--------|----------|--------|--------|--------|-----------|-----------|----------|----------|---------|----------|
| | 15 | 3,5841 | 0,0050 | 0,7391 | 0,8113 | 0,5996 | 54 | 0.1281* | 0 5710* | 0.0071* | 0.0000* | |
| | JS | (10) | (11) | (10) | (12) | (11) | 54 | 0,1381 | 0,3719 | -0,0071 | 0,0000 | - |
| | We | 5,6614 | -0,1898 | 0,5886 | 0,6814 | 0,4011 | 68 | | | | | |
| | W 3 | (14) | (13) | (13) | (14) | (14) | 08 | - | - | - | - | - |
| | HS | 4,1597 | 0,0125 | 0,7247 | 0,7826 | 0,5671 | 60 | 0 1/73* | | | | |
| | | (13) | (11) | (10) | (13) | (13) | 00 | 0,1475 | - | - | - | |
| | Gd | 4,1556 | 0,0043 | 0,7101 | 0,8059 | 0,5723 | 57 | 0.6061* | 1 2878* | 1 6360* | | |
| | | (12) | (9) | (12) | (12) | (12) | 57 | 0,0001 | 1,2070 | 1,0500 | | |
| | AP | 3,8607 | 0,0033 | 0,7559 | 0,8457 | 0,6392 | 23 | 0.2792* | 0.4145* | _ | _ | _ |
| | | (4) | (7) | (4) | (4) | (4) | 23 | 0,2772 | 0,4145 | _ | _ | |
| | AF | 3,8377 | 0,0031 | 0,7592 | 0,8490 | 0,6446 | 15 | 0.2600* | 0 5690* | -0 1727* | _ | _ |
| | | (3) | (5) | (3) | (2) | (2) | 15 | 0,2000 | 0,5070 | -0,1727 | _ | |
| | EY | 3,8326 | 0,0031 | 0,7599 | 0,8497 | 0,6457 | 9 0.2496* | 0 7452* | -0.6581* | 0 3443* | _ | |
| | | (1) | (5) | (1) | (1) | (1) | , | 0,2470 | 0,7432 | -0,0501 | 0,5445 | |
| | AD | 4,0480 | 0,0012 | 0,7265 | 0,8279 | 0,6015 | 38 | 0 5909* | 0 2327* | _ | _ | _ |
| | | (9) | (3) | (9) | (9) | (8) | 50 | 0,3707 | 0,2527 | | | |
| | FM | 3,9462 | 0,0031 | 0,7430 | 0,8349 | 0,6204 | 25 | 0.0536* | 0.2515* | _ | _ | _ |
| Vicosa | | (5) | (5) | (5) | (5) | (5) | 23 | 25 0,0550 | 0,2313 | | | |
| v içosa | Nw | 3,8373 | 0,0032 | 0,7593 | 0,8489 | 0,6445 | 16 | 0 3556* | 0 3186* | 0.0617* | _ | _ |
| | | (2) | (6) | (2) | (3) | (3) | 10 | 0,5550 | 0,5100 | 0,0017 | | |
| | $H\sigma$ | 4,0585 | -5,4E-12 | 0,7247 | 0,8270 | 0,5993 | 39 | 0.1862* | -4 3166* | _ | _ | _ |
| | | (10) | (2) | (10) | (7) | (10) | | 0,1002 | 1,5100 | | | |
| | $Ch \ 1$ | 4,0246 | 0,0039 | 0,7312 | 0,8242 | 0,6027 | 37 | 0 1993* | -0 1720* | _ | - | _ |
| | | (7) | (8) | (7) | (8) | (7) | 57 | 0,1775 | 0,1720 | | | |
| | Hn | 4,0059 | -8,1E-13 | 0,7331 | 0,8340 | 0,6114 | 25 | 0 1559* | 0 2337* | -0.0887* | 0.0010* | -7 1903* |
| | | (6) | (1) | (6) | (6) | (6) | | 0,1007 | 0,2007 | 0,0007 | 0,0010 | |
| | Ch 2 | 4,0740 | 0,0025 | 0,7226 | 0,8206 | 0,5930 | 47 | 0.2842* | -0 1842* | _ | - | _ |
| | | (11) | (4) | (11) | (10) | (11) | ., | 0,2012 | 0,1012 | | | |
| | JS | 4,0326 | 0,0054 | 0,7310 | 0,8199 | 0,5994 | 46 | 0.0961* | 0 6774* | -0.0026* | 0.0000* | _ |
| _ | | (8) | (10) | (8) | (11) | (9) | | 3,0701 | | | | |
| | Ws | 5,3879 | -0,1534 | 0,6091 | 0,7431 | 0,4526 | 67 | - | _ | _ | - | _ |
| | 115 | (14) | (12) | (13) | (14) | (14) | 07 | | | | | |

* Valores significativos pelo teste t (α =0,05). ^{ns} Valores não significativos pelo teste t (mesma probabilidade). - Ausência de coeficiente no modelo. Os valores entre parênteses, abaixo das estatísticas, são atribuídos para o valor do índice VP. O valor um é atribuído ao melhor modelo em cada estatística, enquanto o valor 14 é atribuído ao pior modelo.

Modelos: AD – Ampratwum e Dorvlo (1999); AE – Akinoglu e Ecevit (1990); AP – Angströn-Prescott (1940); Ch_1 – Chen et al. (2004); Ch_2 – Chen et al. (2004); EM – Elagib e Mansell (2000); EY – Ertekin e Yaldiz (2000); Gd – Goodin et al. (1999); Hg – Hargreaves et al. (1985); Hn – Hunt et al. (1998); HS – Hargreaves e Samani (1982); JS – De Jong e Stewart (1993); Nw – Newland (1989); Ws – Weiss et al. (2001).

Os modelos propostos por De Jong e Stewart (1993) (*JS*) e Hunt et al. (1998) (*Hn*) utilizam em diferentes relações funcionais, dados de entrada de temperatura além da precipitação (Tabela 1), dificultando o ajuste desses modelos, principalmente em locais que apresentam grande variação sazonal e espacial da precipitação, exatamente o que ocorre em Minas Gerais (REBOITA et al., 2015). Para o modelo *JS*, os coeficientes b_0 e b_1 variaram de 0,0625 a 0,3602 e 0,1296 a 0,8140, respectivamente (Tabela 4), resultado discrepante ao encontrado por Silva et al. (2012a,b). Porém, os coeficientes b_2 e b_3 , que calibram os dados de precipitação, apresentaram valores próximos a zero, indicando que a inclusão dessa variável exerce pouca influência na estimativa da H_s, concordando com Liu et al. (2009) e Silva et al. (2012b). O modelo *Hn* registrou uma variação considerável no coeficiente b_4 (Tabela 4), resultado semelhante ao encontrado por Silva et al. (2012a,b). Já Liu et al. (2009) obtiveram valores mais discrepantes para o coeficiente b_1 . Para *Hn*, os coeficientes que acompanham a variável P (b_2 e b_3) também apresentaram valores próximos de zero para diversos estudos, como os de Silva et al. (2012a) e Souza et al. (2017).

Geralmente, modelos que possuem coeficientes de calibração dependentes da precipitação possuem ajustes fracos a moderados. Essa dificuldade na estimativa da H_s foi observada por Souza et al. (2017), para a região Amazônia e Cerrado brasileiro, Liu et al. (2009) para a China e Silva et al. (2012b) para três regiões de Minas Gerais, e está atribuído a erros de medição nos instrumentos de precipitação e da falta de acurácia no preenchimento de falhas de registros (Souza et al., 2017). Discordando desses estudos, o presente trabalho obteve um resultado razoável para o ajuste do modelo *Hn*, dependente da precipitação, para as localidades de Minas Gerais, com uma média de VP de 38,6 (Tabela 4), a mais baixa após os modelos que dependem da variável razão de insolação (n/N).

Os demais modelos, exceto o *Ws*, possuem a inclusão da variável razão de insolação (n/N), sendo uma categoria de modelo bastante utilizada na estimativa da H_s (ALMOROX e HONTORIA, 2004; LIU et al., 2009; ADARAMOLA, 2012; BURIOL et al., 2012). Essa categoria de modelo deriva do proposto por Angström (1924), o qual verificou a linearidade entre a média da H_s diária para dias de céu claro, a insolação real (n) e duração máxima de sol - fotoperíodo (N) (ALMOROX e HONTORIA, 2004; LIU et al., 2009). Para resolver a dificuldade em obter os dados de H_s para os dias de céu claro, Prescott (1940) sugeriu o uso de H₀, simplificando o modelo de Angström (1924) de modo que, a partir dos coeficientes linear (b₀) e angular (b₁) da equação de regressão simples entre a razão de insolação (n/N) e H_s, fosse possível estimar H_s, sendo denominado modelo de Angström-Prescott (*AP*) (BLANCO e SENTELHAS, 2002; DANTAS et al., 2003; SANTOS et al., 2003).

No modelo *AP* (Tabela 1), os valores do coeficiente b_0 estão relacionados com a H_s difusa e b_1 com a H_s direta (BURIOL et al., 2012), os quais variam entre zero e um (LIU et al., 2009). Pela Tabela 4, observa-se que b_0 varia de 0,2308 a 0,4411 e b_1 de 0,0702 a 0,5986 entre as localidades, corroborando com os estudos de calibração utilizando o modelo *AP* em escala diária proposto por Liu et al. (2009) e Santos et al. (2003) para a China e Ilha Solteira (SP), respectivamente. Os valores mais elevados do coeficiente b_0 da equação *AP* foram para as localidades de Caratinga (0,4401), Araçuaí (0,4381) e Belo Horizonte (0,4012), indicando que a H_s difusa é maior para essas localidades do que em Machado (0,2308), Lavras (0,2443) e Paracatu (0,2598). Em contrapartida, os valores mais elevados de b_1 demonstram exatamente o oposto, que para as localidades de Machado (0,5986), Paracatu (0,5240) e Lavras (0,4872) a H_s direta é superior a Caratinga (0,0702), Araçuaí (0,1666) e Belo Horizonte (0,1985).

Outros tipos de modelos foram propostos na literatura para estimar a H_s a partir de dados de n com a finalidade de melhorar a precisão das estimativas. Um dos aspectos dessas modificações consiste na adição de termos à equação aumentando a ordem da razão de insolação (n/N) (LIU et al., 2009). Dentre eles, a relação quadrática proposta por Akinoglu e Ecevit (1990) (*AE*) e a de terceiro grau proposta por Ertekin e Yaldiz (2000) (*EY*). Além disso, existem as relações logarítmicas, propostas por Ampratwum e Dorvlo (1999) (*AD*), exponenciais, propostas por Elagib e Mansell (2000) (*EM*), e linear-logarítmica proposta por Newland (1989) (*Nw*) (Tabela 1). Almorox e Hontoria (2004) e Liu et al. (2009) afirmam que os modelos modificados apresentam melhorias no desempenho da estimativa de H_s, porém com pouca variação na qualidade dos ajustes quando comparado ao modelo *AP*, podendo variar de região para região e isso foi exatamente o que aconteceu neste estudo (Tabela 4). Os modelos *AE* (VP médio de 17,8), *AD* (VP médio de 31,5), *EM* (VP médio de 24) e especialmente *EY* e *Nw* (11,9 e 15,4, respectivamente) foram os que apresentaram melhor qualidade de ajuste, com os menores valores de VP's, para todas as localidades de Minas Gerais.

Comparando globalmente todos os modelos, observa-se que os intervalos de r e RQME, de modo geral, foram de 0,0494 a 0,8629 e 2,7904 a 8,6603 MJ.m⁻².dia⁻¹, respectivamente (Tabela 4). Os valores inferiores de r e superiores de RQME estão concentrados no modelo *Ws*, que foi considerado o pior modelo para a estimativa da H_s em Minas Gerais. Almorox et al. (2011), Souza et al. (2017) e Silva et al. (2012b) encontraram valores das estatísticas mais próximas entre os modelos avaliados. Já, Borges et al. (2010) em Cruz das Almas (BA), obtiveram valores de RQME semelhantes aos obtidos nesse estudo,

entre 3,54 a 10,43 MJ.m⁻².dia⁻¹. Por esse motivo, é relevante avaliar o desempenho dos modelos através da comparação conjunta das estatísticas por meio de indicadores, como o VP, impossibilitando que um modelo seja satisfatório para um índice e insatisfatório para outro (SILVA et al., 2012b; MARTINS et al., 2014; SOUZA et al., 2017).

Resumidamente, foi possível identificar três grupos baseados na qualidade do ajuste: o primeiro grupo (I), de melhor desempenho e menor valor de VP, foi composto pelos modelos: *EY* (VP médio de 11,9), *Nw* (VP médio de 15,4) e *AE* (VP médio de 17,8) (Tabela 4), os quais são dependentes das variáveis n e N, e possuem RQME em média de 3,8306 MJ.m⁻².dia⁻¹. O segundo grupo (II), de desempenho moderado, foi composto pelos modelos: *AP* (VP médio de 20,9), *EM* (VP médio de 24), *AD* (VP médio de 31,5), *Hn* (VP médio de 38,6) e *Gd* (VP médio de 40) e possuem RQME em média de 4,0732 MJ.m⁻².dia⁻¹, e o terceiro grupo (III) de péssimo desempenho e maiores valores de VP, foi composto pelos modelos restantes: *Ch_1* (VP médio de 41,3), *JS* (VP médio de 42), *Ch_2* (VP médio de 42,8), *Hg* (VP médio de 47,2), *HS* (VP médio de 56,4) e *Ws* (VP médio de 64), com RQME em média de 4,6865 MJ.m⁻².dia⁻¹.

Dessa forma e com a finalidade de selecionar os melhores modelos para a validação, escolheram-se os modelos de melhor desempenho no ajuste – *EY*, *Nw* e *AE*. Adicionalmente foi escolhido o modelo *Hn* e *Gd*, que apresentaram os menores VP comparados aos modelos baseados na inclusão da temperatura do ar e, para o modelo *Hn* também a precipitação. Mesmo sendo modelos de qualidade de ajuste de desempenho moderado (grupo II), a escolha se baseou no fato da temperatura ser uma variável de fácil medição, independente do tipo de estação meteorológica, constituindo em uma vantagem na inclusão desta variável nos modelos que apresentam a inclusão de n e n/N, apesar do melhor desempenho no ajuste, são modelos que requerem a medição dessa variável, as quais são exclusivas de estações meteorológicas convencionais (BURIOL et al., 2012).

De modo geral, as discrepâncias obtidas nos valores dos coeficientes estão de acordo com as encontradas na literatura para modelos regionais com diferentes calibrações e variações na qualidade dos ajustes, os quais são esperados (SOUZA et al., 2017). De acordo com Meza e Varas (2000), Weiss e Hays (2004) e Souza et al. (2017), essas diferenças indicam que a calibração local é essencial para o desempenho dos modelos. Essa afirmativa é corroborada pela análise dos valores das estatísticas do modelo proposto por Weiss et al. (2001) (*Ws*) em todas as localidades, que por não possuir coeficiente de calibração (Tabela 1) apresentam os piores resultados de RQME (média de 6,2849), BIAS (média de -0,2046), r

(média de 0,5123), d (média de 0,6388), c (média de 0,3574) e, consequentemente, alto valor de VP (média de 64) (Tabela 4). Esse modelo não foi eficiente para a estimativa da H_s em Cruz das Almas (BA) (BORGES et al., 2010), na América do Norte (BALL et al., 2004), e diferentes biomas do Mato Grosso (SOUZA et al., 2017) em que os autores enfatizam as limitações existentes para a aplicação do modelo em diversas regiões sem a possibilidade da devida calibração local.

Independentemente da localidade, dos cinco modelos escolhidos (*EY*, *AE*, *Nw*, *Hn* e *Gd*) para a validação, os que dependem da razão de insolação (n/N) (*EY*, *AE* e *Nw*) foram semelhantes entre si e obtiveram os melhores resultados (Tabela 5). Dentre as dez localidades, cinco apresentaram boa validação (Lavras, Machado, Montes Claros, Paracatu e Viçosa), com índice 'c' variando entre 0,5532 a 0,8272. Pirapora obteve uma validação com índice 'c' variando entre 0,4455 a 0,4863, tendo seu desempenho classificado como muito fraco. Araçuaí, Araxá, Belo Horizonte e Caratinga obtiveram péssimo desempenho, com índice 'c' variando entre 0,1306 a 0,3352.

| Localidados | Modolog | | | | Estatísticas | |
|-------------|-----------|--------|---------|--------|--------------|-----------|
| Locanuaues | moucios - | RQME | BIAS | r | d | С |
| | EV | 5 5057 | 0.0520 | 0.4612 | 0 5666 | 0,2614 |
| | LI | 5,5057 | -0,0330 | 0,4015 | 0,3000 | (Péssimo) |
| | Nu | 5 5001 | 0.0541 | 0.4641 | 0 5660 | 0,2631 |
| | 1 V W | 5,5001 | -0,0341 | 0,4041 | 0,5009 | (Péssimo) |
| Aracuaí | ٨E | 5 /061 | 0.0538 | 0.4651 | 0.5705 | 0,2653 |
| Araçuai | AL | 5,4901 | -0,0558 | 0,4031 | 0,5705 | (Péssimo) |
| | Нп | 5 4808 | -0.0261 | 0 4495 | 0 5746 | 0,2583 |
| | 11/1 | 5,4000 | -0,0201 | 0,++)5 | 0,5740 | (Péssimo) |
| | Gd | 5 3225 | -0.0250 | 0 4487 | 0 5752 | 0,2581 |
| | 04 | 5,5225 | 0,0250 | 0,1107 | 0,5752 | (Péssimo) |
| | EY | 5 4410 | -0.0503 | 0 4885 | 0 6808 | 0,3326 |
| | | 5,1110 | 0,0000 | 0,1005 | 0,0000 | (Péssimo) |
| Araxá | Nw | 5 4208 | -0 0494 | 0 4911 | 0.6826 | 0,3352 |
| | 1 1 1 1 | 5,1200 | 0,0171 | 0,1911 | 0,0020 | (Péssimo) |
| | AE | 5 4423 | -0.0489 | 0 4877 | 0.6827 | 0,3330 |
| | 1112 | 5,7725 | 0,0407 | 0,7077 | 0,0027 | (Péssimo) |

Tabela 5 - Validação dos melhores modelos para a estimativa de radiação solar global em dez localidades de Minas Gerais.

| | II | 5 5 1 5 0 | 0.0202 | 0.4220 | 0 (172 | 0,2605 |
|-----------|----|-----------|---------|--------|--------|-------------|
| | нп | 5,5150 | -0,0302 | 0,4220 | 0,0172 | (Péssimo) |
| | Cd | 5 5685 | 0.0305 | 0 4222 | 0.6178 | 0,2608 |
| | Gu | 5,5085 | -0,0393 | 0,4222 | 0,0178 | (Péssimo) |
| | FY | 5 1386 | -0 0247 | 0 3275 | 0 5362 | 0,1756 |
| | DI | 5,1500 | 0,0217 | 0,5275 | 0,0002 | (Péssimo) |
| | Nw | 5 1344 | -0.0252 | 0 3294 | 0 5377 | 0,1771 |
| | | 0,1011 | 0,0202 | 0,0271 | 0,0077 | (Péssimo) |
| Belo | AE | 5,1338 | -0.0252 | 0.3296 | 0.5378 | 0,1772 |
| Horizonte | | 2,1220 | 0,0202 | 0,0270 | 0,0070 | (Péssimo) |
| | Hn | 4,9410 | 0.0121 | 0.3524 | 0.4250 | 0,1498 |
| | | .,,, | 0,0121 | 0,0021 | 0,1200 | (Péssimo) |
| | Gd | 4,9758 | 0.0074 | 0.3322 | 0.4054 | 0,1347 |
| | | .,, | ., | -, | -, | (Péssimo) |
| | EY | 5,9730 | -0.0466 | 0.4546 | 0.5434 | 0,2470 |
| | | -,, | ., | -, | -, | (Péssimo) |
| | Nw | 5,9636 | -0.0478 | 0.4587 | 0.5451 | 0,2501 |
| | | - , | -, | -, | - , | (Péssimo) |
| Caratinga | AE | 5,9679 | -0,0475 | 0,4569 | 0,5450 | 0,2490 |
| 0 | | | | | | (Péssimo) |
| | Hn | 6,0069 | -0,0517 | 0,4482 | 0,5355 | 0,2400 |
| | | | | | | (Péssimo) |
| | Gd | 6,2916 | -0,0435 | 0,3609 | 0,3619 | 0,1306 |
| | | | | | | (Péssimo) |
| | EY | 2,7818 | 0,0423 | 0,8864 | 0,9324 | 0,8264 |
| | | | | | | (Muito bom) |
| | Nw | 2,7757 | 0,0420 | 0,8868 | 0,9327 | 0,8272 |
| | | | | | | (Muito bom) |
| Lavras | AE | 2,7914 | 0,0421 | 0,8854 | 0,9319 | 0,8251 |
| | | | | | | (Muito bom) |
| | Hn | 3,3202 | -0,0011 | 0,8151 | 0,8899 | 0,7254 |
| | | | | | | (Bom) |
| | Gd | 3,3269 | 0,0028 | 0,8144 | 0,8848 | 0,7206 |
| | | | | 0,0144 | | (Bom) |
| Machado | EY | 3,4858 | -0,0482 | 0,8416 | 0,9062 | 0,7626 |
| Wachau | | | | - | | (Muito bom) |

| | Nw | 3,4857 | 0.0492 | 0.9416 | 0.0055 | 0,7620 |
|----------|-----|--------|---------|--------|---------------|---------------|
| | INW | 5,4857 | -0,0485 | 0,8410 | 0,9033 | (Muito bom) |
| | AF | 3 4986 | -0 0492 | 0 8406 | 0 9049 | 0,7606 |
| | | 3,4900 | 0,0492 | 0,0400 | 0,7047 | (Muito bom) |
| | Hn | 4.2287 | -0.0770 | 0.7697 | 0.8359 | 0,6434 |
| | | ., | -, | | -, | (Moderado) |
| | Gd | 4,3487 | -0,0666 | 0,7452 | 0.8178 | 0,6094 |
| | | , | , | , | , | (Moderado) |
| | EY | 3,4627 | -0,0258 | 0,7894 | 0,8753 | 0,6909 |
| | | | | | - | (Bom) |
| | Nw | 3,4876 | -0,0262 | 0,7861 | 0,8730 | 0,6862 |
| | | | | | | (Bom) |
| Montes | AE | 3,5013 | -0,0269 | 0,7845 | 0,8722 | 0,6842 |
| Claros | | , | , | , | , | (Bom) |
| | Hn | 4,0547 | -0.0338 | 0,6963 | 0,7945 | 0,5532 |
| | | , | , | , | , | (Fraco) |
| | Gd | 3,8312 | -0,0293 | 0,7334 | 0,8254 | 0,6054 |
| | | - , | -, | - , | -, | (Fraco) |
| | EY | 3,5566 | 0,0095 | 0,8088 | 0.8817 | 0,7132 |
| | | , | , | , | , | (Bom) |
| | Nw | 3,5646 | 0,0089 | 0,8076 | 0.8817 | 0,7121 |
| | | | · | | - | (Bom) |
| Paracatu | AE | 3,5566 | 0,0095 | 0,8088 | 0,8819 | 0,7133 |
| | | | - | | | (Bom) |
| | Hn | 3,9889 | 0,0022 | 0,7580 | 0,8256 | 0,6258 |
| | | | | | | (Moderado) |
| | Gd | 3,9292 | 0,0138 | 0,7632 | 0.8388 | 0,6402 |
| | | | · | | - | (Moderado) |
| | EY | 5,1425 | 0,0958 | 0,6432 | 0,7561 | 0,4863 |
| | | | | | | (Muito fraco) |
| | Nw | 5,1430 | 0,0961 | 0,6433 | 0,7556 | 0,4860 |
| Pirapora | | , | , | , | , | (Muito fraco) |
| I | AE | 5,1389 | 0,0946 | 0,6424 | 0,7552 | 0,4851 |
| | | , | , - | | | (Muito fraco) |
| | Hn | 5.0960 | 0 0869 | 0.6407 | 0.7421 | 0,4754 |
| | | 2,3700 | 0,0007 | 0,0107 | <i>,, 121</i> | (Muito fraco) |

| | Gd | 5,2305 | 0,0919 | 0,6184 | 0,7205 | 0,4455 (Muito fraco) |
|--------|----|--------|--------|--------|--------|-------------------------|
| | EY | 3,3272 | 0,0294 | 0,8621 | 0,9060 | 0,7810 (Muito bom) |
| | Nw | 3,3366 | 0,0295 | 0,8612 | 0,9053 | 0,7796 (Muito bom) |
| Viçosa | AE | 3,3517 | 0,0283 | 0,8594 | 0,9043 | 0,7771 (Muito bom) |
| | Hn | 3,5148 | 0,0163 | 0,8391 | 0,8934 | 0,7496 (Bom) |
| | Gd | 3,8184 | 0,0190 | 0,8164 | 0,8589 | 0,7012 (Bom) |

Valores entre parênteses representam a classificação pelo índice 'c' (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

De maneira geral, exceto em Montes Claros e Paracatu, o modelo Gd foi o que apresentou piores resultados para a validação, seguido do modelo Hn (Tabela 5, Figuras 2,3). Além disso, os modelos dependentes da razão de insolação (n/N) (*EY*, *AE* e *Nw*) foram os que apresentaram melhor desempenho na estimativa da H_s para as dez localidades de Minas Gerais.

Pela análise da Figura 2 para as localidades de Araçuaí, o modelo *Gd* apresentou valores estimados praticamente constantes em torno de 20 MJ.m⁻².dia⁻¹, e, devido a péssima validação (Tabela 5), os valores estimados não se aproximam da reta 1:1. Araxá também apresentou péssima validação para os cinco modelos. No entanto, diferentemente de Araçuaí, o modelo *Gd* possui valores estimados dispersos em torno da reta 1:1 (Figura 2). Por pior que tenha sido o resultado do desempenho dos modelos para Araçuaí e Araxá, ainda assim há a superioridade dos modelos dependentes da razão de insolação (n/N) (*EY*, *AE* e *Nw*). No entanto, não é possível a escolha de um modelo para a estimativa da H_s nestas localidades. Para Belo Horizonte e Caratinga não foi possível escolher o melhor modelo em função da péssima validação (Tabela 5) de ambas as localidades. Esses resultados corroboram com os da Figura 2, onde se observa que os valores estimados são praticamente constantes entre 10 MJ.m⁻².dia⁻¹ e 20 MJ.m⁻².dia⁻¹. Essa constância na estimativa de H_s também foi encontrada por Freitas et al. (2015) nos ajustes mensais de H_s para Belo Horizonte usando modelos de estimativa baseados somente na temperatura do ar. Essa impossibilidade de escolha do melhor modelo pode ter sido ocasionada pela baixa qualidade dos dados observados da H_s,

possivelmente devido à falta de calibração destes instrumentos. Não foram encontradas informações sobre as datas de manutenção dos piranômetros de ambas as localidades.

As localidades de Lavras (Figura 2), Machado, Montes Claros e Viçosa (Figura 3) apresentam semelhanças entre os valores observados de H_s e estimados pelos modelos *EY*, *AE* e *Nw*. Apesar disso, deve ser dada prioridade na escolha do modelo *Nw* para Lavras, em função do melhor desempenho deste modelo (c de 0,8272) e do modelo *EY* para as demais localidades, com índice 'c' superior aos demais (Tabela 5). Para a localidade de Paracatu (Figura 3), apesar dos quatro modelos, exceto o *Gd*, apresentarem semelhanças entre os valores estimados e observados (Figura 3), o modelo *AE* apresenta índice 'c' superior aos demais (0,7133) (Tabela 5), sendo considerado o melhor modelo para a estimativa de H_s nesta localidade. Apesar da fraca validação para a localidade de Pirapora (Tabela 5), o modelo que apresentou o melhor desempenho dentre os cinco foi o *EY*, apresentando índice 'c' ligeiramente superior aos demais (0,4863).



Figura 2 - Radiação solar global estimada versus observada ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$) para os cinco melhores modelos (*EY*: Ertekin e Yaldiz, 2000; *AE*: Akinoglu e Ecevit, 1990; *Nw*: Newland, 1989; *Hn*: Hunt et al., 1998 e *Gd*: Goodin et al., 1999) para as localidades de Araçuaí, Araxá, Belo Horizonte, Caratinga e Lavras. A linha cheia refere-se a reta 1:1.



Figura 3 - Radiação solar global estimada versus observada (MJ.m⁻².dia⁻¹) para os cinco melhores modelos (EY: Ertekin e Yaldiz, 2000; AE: Akinoglu e Ecevit, 1990; Nw: Newland, 1989; Hn: Hunt et al., 1998 e Gd: Goodin et al., 1999) para as localidades de Machado, Montes Claros, Paracatu, Pirapora e Viçosa. A linha cheia refere-se a reta 1:1.

A tendência geral de todos os modelos validados é superestimar os valores de H_s entre 5 e 10 MJ.m⁻².dia⁻¹ e subestimar os valores superiores a 25 MJ.m⁻².dia⁻¹. Esta mesma tendência foi constatada na China por Liu et al. (2009), em Cruz das Almas (BA) por Borges et al. (2010), nas regiões Metropolitanas, Zona da Mata, Vale do Rio Doce e noroeste de Minas Gerais por Silva et al. (2012a,b) e em diferentes regiões do Mato Grosso por Souza et al. (2017) utilizando modelos diferentes aos escolhidos para a validação. Isto provavelmente se deve a limitação dos modelos em estimar a radiação abaixo e acima destes patamares. Além disso, ao longo do ano, os dados de H_s em Minas Gerais encontraram-se em torno de 13,0 e 23,7 MJ.m⁻².dia⁻¹ (Tabela 3) e para esses valores, os cinco modelos são capazes de estimar razoavelmente a H_s. No entanto, há a necessidade de melhorias nas relações funcionais dos modelos empíricos existentes (SILVA et al., 2012a), inclusão de novas variáveis assim como o desenvolvimento de modelos mais adequados, principalmente para regiões que apresentam variação temporal e espacial de temperatura, precipitação e nebulosidade, como o que ocorre em Minas Gerais.

5. CONCLUSÕES

Houve diferença no ajuste e na calibração dos modelos de estimativa da radiação solar global para as dez localidades de Minas Gerais. De maneira geral, os modelos que apresentam a inclusão da insolação real e razão da insolação foram os que apresentaram melhores resultados, os que consideram a precipitação, exceto para Belo Horizonte e Viçosa, e a temperatura, exceto para Montes Claros, não apresentaram resultados satisfatórios e o modelo de Weiss et al. (2001) - Ws foi considerado o pior.

É necessário ajustar e calibrar os coeficientes dos modelos empíricos para cada localidade em específico, encontrando coeficientes que melhor se ajustam as condições locais. Os modelos selecionados para a estimativa da radiação solar global em Minas Gerais são dependentes da localidade. Para Machado, Montes Claros, Pirapora e Viçosa o modelo selecionado foi o de Ertekin e Yaldiz (2000) – *EY*, para Lavras foi o de Newland (1989) – *Nw* e para Paracatu o de Akinoglu e Ecevit (1990) – *AE*. Já para as localidades de Araçuaí, Araxá, Caratinga e Belo Horizonte não foi possível a escolha de um modelo eficiente.

Independentemente do modelo é comum a subestimativa dos modelos empíricos para radiação solar global para valores acima de 25 MJ.m⁻².dia⁻¹ e superestimativa para valores abaixo de 10 MJ.m⁻².dia⁻¹, evidenciando a necessidade de melhorias constantes nas relações

funcionais e inclusão de novas variáveis, principalmente de fácil medição, na tentativa de obter melhor desempenho na estimativa da radiação solar global.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADARAMOLA, M. S. Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akuri, Nigeria. **Renewable Energy**. v.47, p.38-44, 2012.

AKINOGLU, B. G.; ECEVIT, A. A further comparison and discussion of Sunshine based models to estimate global solar radiation. **Solar Energy**. v.15, p.865-872, 1990.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, Roma, p.300, 1998.

ALMOROX, J.; HONTORIA, C.; BENITO, M. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). **Applied Energy**. v.88, p.1703-1709, 2011.

ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using Sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**. v.45, p.1529-1535, 2004.

AMPRATWUM, D. B.; DORVLO, A. S. S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. **Applied Energy**. v.63, p.161-167, 1999.

ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. v.50, p.121-126, 1924.

ANNANDALE, J. G.; JOVANIC, N. Z.; BENADE, N.; ALLEN, R. G. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**. v.21, p.57-67, 2002.

AL-SALAYMEH, A. Model for the prediction of global daily solar radiation on horizontal surfaces for Amman city. **Emirates Journal of Engineering Research**. v.11, p.49-56, 2006.

BALL, R. A.; PURCELL, L. C.; CAREY, S. K. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. **Agronomy Journal**. v.96, p.391-397, 2004.

BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. P. N. da.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.29, p.494-504, 2014.

BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.10, p.295-300, 2002.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. de.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M. da.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, p.74-80, 2010.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.31, p.159-166, 1984.

BULUT, H. Generation of tyical solar radiation data for Instanbul, Turkey. **International Journal of Energy Research**. v.27, p.847-855, 2003.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; HELDWEIN, A. B.; PRESTES, S. D.; HORN, J. F. C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. **Ciência Rural**. v.42, p.1563-1567, 2012.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.5, p.89-97, 1997.

CHEN, R. S.; ERSI, K.; YANG, J. P.; LU, S. H.; ZHAO, W. Z. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**. v.45, p.1759-1769, 2004.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. **Revista Engenharia Agrícola**. v.30, p.619-626, 2010.

COPPOLINO, S. A new correlation between clearness index and relative sunshine. **Renewable Energy**. v.4, p.417-423, 1994.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**. v.27, p.1260-1263, 2003.

DE JONG, R.; STEWART, D. W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. **Canadian Journal of Plant Science**. v.73, p.509-518, 1993.

DONATELLI, M.; CAMPBELL, G. S. A simple model to estimate global solar radiation. In: Fifth Congresso f the European Society for Agronomy, 1998. **Proceedings: Fifth Congresso of the European Society for Agronomy**. v.2, p.133-134, 1998.

ELAGIB, N. A.; MANSELL, M. G. New approaches for estimating global solar radiation across Sudan. **Energy Conversion and Management**. v.41, p.419-434, 2000.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey). **Energy Conversion and Management**. v.41, p.311-330, 2000.

FREITAS, C. H. de.; SIMÕES, J. B.; MARTINS, F. B. Modelos para estimativa da radiação solar incidente mensal em Belo Horizonte, Minas Gerais, usando dados de temperature do ar.
In: IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria, 2015. Anais do IX
Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2015.

GOODIN, D. G.; HUTCHINSON, J. M. S.; VANDERLIP, R. L.; KNAPP, M. C. Estimating solar irradiance for crop modelling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**. v.91, p.845-851, 1999.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE 111, p.265-275, 1985.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potencial evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. v.108, p.225-230, 1982.

HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. Agricultural and Forest Meteorology. v.91, p.293-300, 1998.

INMET:InstitutoNacionaldeMeteorologia.Disponívelem:<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.Acesso em 16 dez. 2016.

INPE: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/index.php. Acesso em 02 jan. 2017.

IZIOMON, M. G.; MAYER, H. Assessment of some global solar radiation parameterizations. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v.64, p.1631-1643, 2002.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. de. Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Angström-Prescott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. **Ciência Rural**. v.43, p.383-389, 2013.

KAPLANIS, S.; KAPLANI, E. A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation values. **Renewable Energy**. v.32, p.1414-1425, 2007.

LÊDO, E. R. F.; SILVA, M. G. da.; NOGUEIRA, D. H.; ARRAES, F. D. D. Avaliação de modelo de estimativa da radiação solar global (Rs) com base na amplitude térmica. **Conexões Ciência e Tecnologia**. v.6, p.15-26, 2012.

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; JOHN, R. P. Calibration of the Angstöm-Prescott coeficientes (a,b) under diferente time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. Agricultural and Forest Meteorology. v.149, p.1433-1446, 2009.

MAHMOOD, R.; HUBBARD, K. G. Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. **Agronomy Journal**. v.94, p.723-733, 2002.

MARTINS, F. B.; PEREIRA, R. A. de A.; PINHEIRO, M. V. M.; ABREU, M. C. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimada por duas categorias de modelos. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.29, p.505-514, 2014.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.42, p.1091-1100, 2007.

MARTÍNEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; DE LA RUBIA, J. The historical evolution of the Angström formula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.33, p.109-128, 1984.

MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. Agricultural and Forest Meteorology. v.100, p.231-241, 2000.

NEWLAND, F. J. A sutdy of solar radiation models for the coastal region of South China. **Solar Energy**. v.43, p.227-235, 1989.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**. v.59, p.211-216, 2002.

PODESTÁ, G. P.; NÚÑEZ, L.; VILLANUEVA, C. A.; SKANSI, M. A. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.123, p.41-53, 2004.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**. v.64, p.114-125, 1940.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**. v.17, p.206-226, 2015.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.25, p.185-204, 2010.

REDDY, S. J. The estimation of global solar radiation and evaporation through precipitation – a note. **Solar Energy**. v.38, p.97-104, 1987.

ROBAA, S. M. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. **Energy Conversion and Management**. v.50, p.184-193,2009.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FIORAVANTI, C. D.; LIMA, R. C.; VALERIO FILHO, W. V. Estimativa da radiação solar global diária em Ilha Solteira, São Paulo. In: XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2003. Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2003.

SILVA, V. J. da.; SILVA, C. R. da.; FINZI, R. R.; DIAS, N. S. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. **Ciência Rural**. v.42, p.276-282, 2012a.

SILVA, C. R. da.; SILVA, V. J. da.; ALVES JÚNIOR, J.; CARVALHO, H. P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.16, p.281-288, 2012b.

SOLER, A. Statistical comparison for 77 European stations of 7 sunshine-based models. **Solar Energy**. v.45, p.365-370, 1990.

SOUZA, A. P. de.; SILVA, A. C. da.; TANAKA, A. A.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T. de.; KLAR, A. E.; GOMES, A. W. A. Global radiation by simplified models for state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.52, p.215-227, 2017.

SOUZA, J. L. de.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**. v.30, p.1203-1220, 2005.

STATSOFT, INC. Statistica for windows (data analyses softwares system). Version 8.0 2008.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; GABRIEL, L. F.; SAMBORANHA, F. K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with linear and nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.43, p.449-455, 2008.

THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W. Na improved algorithm for estimating incidente daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. Agricultural and Forest Meteorology. v.93, p.211-228, 1999.

TOGRUL, I. T.; TOGRUL, H.; EVIN, D. Estimation of monthly global solar radiation from Sunshine duration measurement in Elazig. **Renewable Energy**. v.19, p.587-595, 2000.

VALIPOUR, M.; SEFIDKOUHI, M. A. G.; RAEINI-SARJAZ, M. Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. **Agricultural Water Management**. v.180, p.50-60, 2017.

WINSLOW, J. C.; HUNT, Jr. E. R.; PIPER, S. C. A globally applicable model of daily solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. **Ecological Modelling**. v.143, p.227-243, 2001.

WEISS, A.; HAYS, C. J. Simulation of daily solar irradiance. Agricultural and Forest Meteorology. v.123, p.187-199, 2004.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; HU, Q.; EASTERLING, W. E. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop simulations. **Agronomy Journal**. v.93, p.1321-1326, 2001.

WILLMOTT, C. J. On the validation models. Physical Geography. v.2, p.184-194, 1981.

ZHOU, J.; WU, Y.; YAN, G. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China. **Energy Conversion and Management**. v.46, p.257-268, 2005.

ANEXOS

| Modelo | Sigla | Equação | Referência |
|--------|-------|--|----------------------------------|
| 1 | AP | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) \right)$ | Angström (1924) -Prescott (1940) |
| 2 | HS | $H_s = H_0. (b_0. (T_{max} - T_{min})^{0.5})$ | Hargreaves e Samani (1982) |
| 3 | Hg | $H_s = H_0. b_0. (T_{max} - T_{min})^{0.5} + b_1$ | Hargreaves et al. (1985) |
| 4 | Rd | $H_s = b_0 + b_1 \cdot \alpha + b_2 \cdot P^{0,33}$ | Reddy (1987) |
| 5 | Nw | $H_{s} = H_{0} \cdot \left(b_{0} + \left(b_{1} \cdot \frac{n}{N} \right) + \left(b_{2} \cdot \log \frac{n}{N} \right) \right)$ | Newland (1989) |
| 6 | AE | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \frac{n}{N} \right) + b_2 \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^2 \right)$ | Akinoglu e Ecevit (1990) |
| 7 | JS | $H_s = H_0. b_0. (T_{max} - T_{min})^{b_1}. (1 + b_2. P + b_3. P^2)$ | De Jong e Stewart (1993) |
| 8 | Ср | $H_s = \exp(b_0) \cdot \left(\frac{n}{N}\right)^{b_1}$ | Coppolino (1994) |
| 9 | DC | $H_{s} = H_{0}.b_{0}.(1 - \exp\left(-b_{1}.f(T_{avg}).\Delta T^{2}.f(T_{min})\right))$ $f(T_{avg}) = 0017.\exp\left(\exp\left(-0.053.T_{avg(i)}\right)\right)$ $f(T_{min}) = \exp\left(\frac{T_{min}}{b_{2}}\right)$ | Donatelli e Campbell (1998) |
| 10 | Hn | $H_s = H_0. b_0. (T_{max} - T_{min})^{0.5} + b_1. T_{max} + b_2. P + b_3. P^2 + b_4$ | Hunt et al. (1998) |
| 11 | AD | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \log \frac{n}{N} \right) \right)$ | Ampratwum e Dorvlo (1999) |

A1 - Modelos de estimativa da radiação solar global aplicado para a estação meteorológica de Lavras como análise preliminar: abreviatura, equação e referência.

| 12 | Gd | $H_{s} = H_{0} \cdot b_{0} \cdot \left(1 - exp\left(-b_{1} \cdot \left(\frac{(T_{max} - T_{min})^{b_{2}}}{H_{0}} \right) \right) \right)$ | Goodin et al. (1999) |
|----|------|--|---------------------------|
| 13 | TR | $H_s = H_0.(1 - 0.9.\exp(-B.(T_{max} - T_{min})^{1.5}))$ $B = 0.031 + 0.201.\exp(-0.185.T_{avg})$ | Thornton e Running (1999) |
| 14 | EM | $H_s = H_0 \cdot \left(b_0 + \left(b_1 \cdot \exp \frac{n}{N} \right) \right)$ | Elagib e Mansell (2000) |
| 15 | EY | $H_{s} = H_{0} \cdot \left(b_{0} + \left(b_{1} \cdot \frac{n}{N} \right) + b_{2} \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^{2} + b_{3} \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^{3} \right)$ | Ertekin e Yaldiz (2000) |
| 16 | Ws | $H_s = H_0.0,75.\left(1 - \exp\left(-0,226.\frac{(\Delta T)^2}{H_0}\right)\right)$ | Weiss et al. (2001) |
| 17 | Wn | $H_{s} = H_{0}.Dl.\left(1 - \left(b_{0}.\left(\frac{e_{s}(T_{min})}{e_{s}(T_{mix})}\right)\right)\right)$ $Dl = \left(1 - \left(\frac{N}{2}\right) - \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)^{2}}{2\left(\frac{N}{2}\right)^{2}}\right) - 1$ | Winslow et al. (2001) |
| 18 | An | $H_s = H_0. (b_0. (1 + 2.7.10^{-5} . z). (T_{max} - T_{min})^{0.5})$ | Annandale et al. (2002) |
| 19 | MH_1 | $H_{s} = b_{0} \cdot (T_{máx} - T_{min})^{b_{1}} \cdot H_{cc}^{b_{2}}$ $H_{cc} = Is \cdot Tr$ $Tr = 0.8 + 0.12 \cdot (c)^{1.5}$ $c = \left 182 - \frac{NDA}{183} \right $ $Is = 0.04188 \cdot (Ac + Bc \cdot \sin\left(\left(2\pi \cdot \frac{NDA + 10.5}{365}\right) - \left(\frac{\pi}{2}\right)\right))$ | Mahmood e Hubbard (2002) |

| | | $Ac = (0,29.\cos\alpha + 0,52).\left(\sin\alpha.\left(46,355.LD - 574,3885\right)\right)$ | |
|----|-------------|---|---------------------------|
| | | + 816,41. $\cos\alpha$. $\sin\left(\left(LD.\frac{\pi}{24}\right)\right)$ | |
| | | $Bc = (0,29.\cos\alpha + 0,52).\left(\sin\alpha.(574,3885 - 1,509.LD)\right)$ | |
| | | $-\left(29,59.\cos\alpha.\sin\left(\left(LD.\frac{\pi}{24}\right)\right)\right)\right)$ | |
| | | $LD = 0.267. \sin^{-1} \left(0.5 + \left(\frac{0.007895}{\cos \alpha} \right) + (0.2168875. \tan \alpha) \right)^{0.5}$ | |
| 20 | MH_2 | $H_{s} = \frac{\left(\left(b_{0}.\left(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{n}}\right)^{b_{1}}.H_{cc}^{b_{2}}\right) - 2,4999\right)}{0,8023}$ | Mahmood e Hubbard (2002) |
| 21 | Bl | $H_{s} = b_{0} + \left(b_{1} \cdot \left \sin\left(\frac{\pi}{365} \cdot (NDA + 5)\right)\right ^{1,5}\right)$ | Bulut (2003) |
| 22 | Ch_1 | $H_s = H_0. (b_0. (T_{max} - T_{min})^{0.5} + b_1)$ | Chen et al. (2004) |
| 23 | <i>Ch_2</i> | $H_{s} = H_{0} \cdot (b_{0} \cdot \ln(T_{max} - T_{min}) + b_{1})$ | Chen et al. (2004) |
| 24 | AS | $H_s = b_0 + b_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b_2} \cdot NDA + b_3\right)$ | Al-Salaymeh (2006) |
| 25 | Kp_1 | $H_s = b_0 + b_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{364} \cdot NDA + b_2\right)$ | Kaplanis e Kaplani (2007) |
| 26 | Кр_2 | $H_s = b_0 + b_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi b_2}{365} \cdot NDA + b_3\right) + b_4 \cdot \cos\left(\frac{2\pi b_5}{365} \cdot NDA + b_6\right)$ | Kaplanis e Kaplani (2007) |

Em que: H_s é a radiação solar global (MJ.m⁻².dia⁻¹). H_0 é a radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ.m⁻².dia⁻¹), dado por: $H_0 = \frac{0.0864}{\pi} \cdot 1367 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left[(h \cdot sen\alpha \cdot sen\delta) + (cos\alpha \cdot cos\delta \cdot senh)\right];$ em que $\left(\frac{d}{D}\right)^2$ é a distância média Terra-Sol (km), dado por: $\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0.033$. cos $\left(\frac{NDA.360}{365}\right);$ NDA é número do dia do ano; h é o ângulo horário do nascer do Sol (graus), dado por: $h = \arccos - (tan\alpha \cdot tan\delta); \alpha$ é a latitude (graus); δ é a declinação solar (radianos), dado por: $\delta = 23.45 \cdot sen\left(\frac{360.(284+NDA)}{365}\right)$. $T_{máx}$ é a temperatura máxima do dia (°C). $T_{mín}$ é a temperatura mínima do dia (°C). z é a elevação acima do nível médio do mar (m). i corresponde ao dia. $e_s(T_{mín})$ é a pressão de vapor de saturação referente a temperatura mínima (mmHg). $e_s(T_{máx})$ é a pressão de vapor de saturação referente a temperatura mínima (mmHg). n é a insolação real (horas.dia⁻¹). P é a precipitação diária (mm). T_{avg} é a amplitude térmica padrão (°C), dada por: $T_{avg} = \frac{T_{máx(i)} + T_{min(i)}}{2}$. ΔT é a amplitude térmica modificada (°C), dada por: $\Delta T = \frac{T_{máx(i)} - (T_{min(i)} + T_{min(i+1)})}{2}$. $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ são os coeficientes de calibração dos modelos (as modelos).

| Modelos | Índice c | r |
|-------------|----------|---------|
| HS | 0,5984 | 0,7893 |
| An | 0,1835 | 0,7893 |
| DC | 0,1507 | 0,4385 |
| Gd | 0,6962 | 0,8144 |
| Wn | -0,0226 | -0,5665 |
| MH_1 | 0,4016 | 0,5802 |
| MH_2 | 0,4076 | 0,5831 |
| AP | 0,7914 | 0,8658 |
| AE | 0,7952 | 0,8854 |
| EY | 0,7960 | 0,8864 |
| AD | 0,7283 | 0,8245 |
| EM | 0,7718 | 0,8576 |
| Nw | 0,7962 | 0,8868 |
| Ср | 0,5015 | 0,6084 |
| Bl | 0,0033 | 0,0164 |
| AS | 0,0004 | 0,0032 |
| Kp_1 | 0,0988 | 0,0095 |
| Кр_2 | 0,5990 | -0,1416 |
| Hg | 0,6220 | 0,7893 |
| Rd | 0,0994 | 0,2244 |
| Ch_1 | 0,6981 | 0,8150 |
| Hn | 0,6669 | 0,8151 |
| <i>Ch_2</i> | 0,6906 | 0,8065 |
| JS | 0,6925 | 0,8139 |
| TR | 0,3828 | 0,7832 |
| Ws | 0,5878 | 0,7359 |

A2 - Resultados do índice c do ajuste e r da validação para Lavras.